ORSAY
n° d'ordre : 3245

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

Pour obtenir

Le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE
SPECIALITE : PHYSIQUE NUCLEAIRE Option : physique des réacteurs

PAR

CHAUCHEPRAT Patrick

CONTRIBUTION A LA QUALIFICATION DU CALCUL DU GADOLINIUM DANS LES REACTEURS A EAU

Soutenue le 18 juin 1982 devant la Commission d'examen

MM. HERPIN Président
BOUCHARD
CHABRILLAC
DARROUZET
VIDAL

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543515_0035

ORSAY
n° d'ordre : 3245

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

Pour obtenir

Le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE
SPECIALITE : PHYSIQUE NUCLEAIRE Option : physique des réacteurs

PAR

CHAUCHEPRAT Patrick

CONTRIBUTION A LA QUALIFICATION DU CALCUL DU GADOLINIUM DANS LES REACTEURS A EAU

Soutenue le 18 juin 1982 devant la Commission d'examen

MM. HERPIN Président
BOUCHARD
CHABRILLAC
DARROUZET
VIDAL

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

R E M E R C I E M E N T S

Ce travail a été réalisé au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, au Laboratoire de Physique des Réacteurs à Eau.

Je remercie M. HERPIN, Professeur à l'Université de Paris-Sud d'avoir accepté de présider cette Commission d'Examen.

Je suis très reconnaissant à M. VIDAL, Coordonnateur des études sur les réacteurs à eau au C.E.A., d'avoir assumé la direction de ce travail.

Je remercie M. CHABRILLAC, Chef de la Division Procédés à FRAMATOME, d'avoir accepté d'être membre du Jury de cette thèse.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude à Messieurs BOUCHARD et DARROUZET qui m'ont permis de mener cette étude.

Je remercie tout particulièrement M. SANTAMARINA pour les fructueuses discussions que nous avons eues ensemble et pour son aide constante et amicale tout au long de cette thèse.

Je remercie également M. MARTIN-DEIDIER pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail notamment pour la partie expérimentale.

Qu'il me soit permis d'adresser mes plus vifs remerciements à tous les techniciens de la pile Minerve pour leur précieuse collaboration, leur accueil très chaleureux et leur soutien constant.

Enfin, je ne saurais oublier toutes les personnes qui m'ont grandement aidé, à des titres divers, dans la réalisation de ce travail avec une pensée toute particulière à Messieurs NOUVEAU, ROBIN et SALMON.

S O M M A I R E

PAGES

I. INTRODUCTION 9

II. ETAT DE LA SITUATION SUR LE GADOLINIUM 13

1 - L'élément gadolinium 13
1.1 - Propriétés physiques et chimiques du gadolinium 13
1.2 - Données nucléaires de base 15

2 - Le gadolinium en tant que poison consommable 18
2.1 - L'emploi du gadolinium dans les réacteurs à eau pressurisée 18
2.2 - Etude paramétrique de l'efficacité du gadolinium en fonction du poison lui-même et des propriétés neutroniques du réseau extérieur 22

2.2.1 - Objectif de l'étude 22

2.2.2 - Paramètres du crayon gadolinié 23
a) Effet du support 23
b) Effet de l'enrichissement en U235 25
c) Effet de la teneur en Gd_2O_3 29

2.2.3 - Paramètres du réseau extérieur 30
a) Effet de l'enrichissement en U235 30

PAGES

b) Effet du rapport de modération 31

2.2.4 - Conclusion 32

III. ETUDE DU GADOLINIUM AU TEMPS ZERO : EXPERIENCE MELODIE IV 33

1 - But de l'expérience 33

2 - Réalisation de l'expérience Mélodie IV dans le réacteur Minerve 33

2.1 - Description de l'assemblage 34

2.1.1 - Généralités 34

2.1.2 - L'assemblage Mélodie IV 35

2.1.3 - Description de la zone thermique nourricière 35

2.1.3.1 - Eléments combustibles 35

2.1.3.2 - Barres absorbantes de contrôle 36

2.1.3.3 - Le réflecteur 36

2.1.4 - Description du massif Mélodie IV 37

2.1.4.1 - Le massif 37

2.1.4.2 - Le réseau 37

2.1.4.3 - Les crayons combustibles et absorbants 38

2.2 - Méthodes de mesures 39

2.2.1 - Mesures par oscillations .....

a) La technique de mesures par oscillations 39

PAGES

b) Conception et réalisation des échantillons d'oscillations en fonction des paramètres neutroniques à étudier 39
c) Déroulement des mesures par oscillations 40
d) Résultats expérimentaux 42

2.2.2 - Mesures d'efficacité de grappes d'absorbants 43
a) La technique de mesure d'efficacité de grappes d'absorbants 43
b) Caractéristiques des grappes UO_2 - Gd_2O_3 45
c) Résultats expérimentaux 46

IV. SCHEMA DE CALCUL DU GADOLINIUM 48

1 - Position du problème 48
2 - Calcul de la structure fine du flux à l'intérieur d'une hétérogénéité absorbante 48
3 - Traitement d'un poison sous forme de grains 50
a) Méthode "KERA" 51
b) Expression analytique de f 52
c) Calcul de f avec le module "BIHET" du code APOLLO 54
d) Comparaison des trois méthodes 57
e) Conclusion 58

4) - Etude du couplage entre les différentes cellules d'un réseau comportant une ou plusieurs hétérogénéités absorbantes 58

PAGES

4.1 - Philosophie de l'étude et détermination d'un maillage en énergie minimal 60
4.2 - Rappel des différentes options de calcul du code APOLLO 63
4.3 - Etude de la configuration avec un crayon UO_2 - Gd_2O_3 65
4.4 - Etude de la configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 71
4.5 - Conclusions 75

V. INTERPRETATION DES MESURES PAR OSCILLATIONS ET DES MESURES D'EFFICACITE DE GRAPPES 76

A. Interprétation des mesures par oscillations 76

1 - Obtention de l'effet en réactivité expérimental 76
1.1 - Choix d'un échantillon de référence 76
1.2 - Corrections nécessaires à l'interprétation 76
1.2.1 - Correction de masse de gainage 77
1.2.2 - Correction d'"effet de bout" 77
1.2.3 - Correction de longueur 82

2 - Obtention de l'effet en réactivité par le calcul 84
2.1 - Calcul de l'effet en réactivité en théorie des perturbations 84
2.2 - Présentation des calculs 87
a) Détermination du motif multicellules de base 88
b) Calculs réalisés 88

PAGES

3 - Interprétation des mesures et comparaison expérience-calcul 90
3.1 - Choix de la normalisation 90
3.2 - Echantillons contenant du Gd_2O_3 cobroyé 93
3.2.1 - Echantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (Série D) 93
3.2.1.1 - Interprétation 93
3.2.1.2 - Etude de sensibilité 95
3.2.1.3 - Conclusions relatives à l'oscillation des échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (Série D) 100
3.2.2 - Echantillons UO_2 - Gd_2O_3 (Série C) 102
3.3 - Echantillons contenant du Gd_2O_3 en grains 103
3.3.1 - Echantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 - (Série B) 103
3.3.2 - Echantillons UO_2 - Gd_2O_3 - (Série A) 105
3.3.3 - Conclusions sur la qualification expérimentale des poisons à grains 106

B. Interprétation préliminaire des mesures d'efficacité de grappes de crayons UO_2 - Gd_2O_3 107

1 - Rappel des résultats expérimentaux 107
2 - Comparaison expérience - calcul 107

PAGES

VI. MESURES PAR OSCILLATIONS D'ECHANTILLONS SIMULANT DU COMBUSTIBLE UO_2 - Gd_2O_3 IRRADIE 110

1 - But de l'expérience 110
2 - Réalisation des échantillons d'oscillations 110
2.1 - Détermination des groupements les plus représentatifs 110
2.2 - Description des échantillons d'oscillations 111
3 - Résultats expérimentaux 112
4 - Interprétation des mesures et comparaison expérience-calcul 112
5 - Conclusion 113

VII. ETUDE DU GADOLINIUM EN EVOLUTION 114

1 - Exposé de la situation 114
2 - Présentation de l'expérience "GEDEON" 115
2.1 - Etude de faisabilité neutronique 115
2.2 - Etude d'optimisation de l'expérience : définition des teneurs en gadolinium et du planning de déchargement des crayons gadoliniés 119
2.2.1 - Géométrie de calcul 120
2.2.2 - Etude de sensibilité 121
a) Sensibilité aux sections efficaces 122
b) Sensibilité à l'erreur de flux 122
c) Découplage des 2 types d'erreurs 123
2.2.3 - Variation de la sensibilité avec la teneur en Gd_2O_3 124

PAGES

2.3 - Proposition de programme pour une étude sur le gadolinium cobroyé 125

2.3.1 - Grille expérimentale 125
2.3.2 - Programme de mesures 127

3 - Conclusion sur l'expérience GEDEON 132

VIII CONCLUSION GENERALE 133

Références 136

Annexes :

A - Comparaison entre deux calculs NAUSICAA P1 (à 91 points et 70 points) sur la configuration avec un crayon UO_2 (3 %) Gd_2O_3 (200 mg/cm^3) 142

B - Elaboration de la taille du motif multicellules à utiliser pour l'interprétation des mesures par oscillations 145

Tableaux 151

Figures .....

I. INTRODUCTION

Le contrôle de la réactivité dans les réacteurs à eau pressurisée du parc électronucléaire français est effectué à l'aide de moyens mécaniques (barres de contrôle), de poisons consommables, et par du bore en solution dans le modérateur.

Le bore soluble sert à compenser les lentes variations de réactivité dues principalement à l'épuisement du combustible et à l'apparition des produits de fission ; cependant, sa quantité est limitée de manière à maintenir un coefficient de température négatif. Ce poison soluble suffit en général pour les cycles d'irradiation des réacteurs actuels, excepté lors du premier cycle où, l'excédent initial de réactivité étant trop grand, on utilise pour pallier à la contrainte précédente des poisons consommables qui s'usent progressivement.

Jusqu'à ce jour, les crayons de poison consommable utilisés dans les PWR sont en borosilicate (pyrex). Ceux-ci sont introduits dans les positions réservées au passage de grappes de contrôle et sont retirés à la fin du premier cycle. Si l'on mettait ces crayons pyrex à la place de crayons combustibles, on aurait une double pénalité : diminution de la densité de puissance résultant de la suppression de crayons combustibles et antiréactivité résiduelle due au poison restant et aux structures des crayons pyrex. D'autres problèmes se posent lors du stockage des grappes de pyrex après leur déchargement à la fin du premier cycle car il s'est formé du tritium au cours de leur irradiation.

Depuis quelques années, de nombreuses études sont menées sur un poison consommable "futur" : le gadolinium. Celui-ci possède une forte section d'absorption dans le domaine thermique. Il peut être utilisé avec une très grande souplesse. On peut l'introduire dans un certain nombre de crayons combustibles ce qui permet de profiter de la puissance dégagée par ces crayons après l'usure du gadolinium. Sa capture résiduelle est faible et les assemblages peuvent recevoir des grappes de contrôle. Ainsi, on peut augmenter la durée des cycles et réaliser une meilleure gestion du combustible. A la fin de leur irradiation, les assemblages avec leurs crayons empoisonnés sont déchargés, stockés et retraités. Plusieurs possibilités sont offertes quant à la présentation du gadolinium (ou oxyde de gadolinium) dans les crayons

combustibles : il peut être mis soit sous forme cobroyée, soit sous forme de grains. Cette dernière forme confère au gadolinium une auto-protection d'autant plus forte que la taille des grains est grande ; il est possible d'ajuster plus facilement la réactivité en jouant sur deux paramètres : le diamètre des grains et la charge en gadolinium.

Cependant, l'optimisation des cycles de combustibles dans les réacteurs avec l'emploi du gadolinium ne peut se faire que si les données nucléaires de base de cet élément ainsi que son comportement en évolution sont qualifiés avec une précision suffisante : cet objectif ne peut être atteint qu'avec des expériences de physique "propres", c'est-à-dire minimisant les sources variées d'erreur. Actuellement, certains aspects concernant l'utilisation du gadolinium comme poison consommable ont donné lieu à des expériences. On peut citer :

- des mesures par oscillations d'échantillons de gadolinium métallique /1/, d'alumine gadoliniée /2/ et d'échantillons d'UO_2 - Gd_2O_3 irradiés dans le réflecteur de SILOE /3/ /4/,

- des mesures de distribution de puissance dans MINERVE /5/ et des mesures de distribution de puissance, facteur de conversion et bore critique dans AZUR /6/, /7/, /8/,

- l'irradiation de barreaux UO_2 - Gd_2O_3 (Gd cobroyé ou en grains) dans un réacteur d'irradiation /9/,

- des mesures d'antiréactivité introduite par la dilution de gadolinium dans un réseau à faible modération placé au centre de la pile EOLE /10/,

- des études de configurations avec lattes d'alumine gadoliniée /11/, /12/.

Certaines de ces expériences ne présentaient pas un objectif neutronique et ont soulevé de nombreuses difficultés lors de leurs interprétations. Néanmoins, elles ont contribué, à des degrés divers, à améliorer l'état des connaissances sur le gadolinium. Dernièrement, un programme expérimental a été conçu /13/ afin d'apporter des renseignements supplémentaires sur le gadolinium et conforter les résultats obtenus antérieurement.

Ce programme comporte des expériences d'oscillations dans le réacteur MINERVE, à Cadarache, et une expérience d'irradiation dans la pile MELUSINE, à Grenoble.

Le premier type d'expérience permet de mesurer la réactivité d'un échantillon dans un réseau. Elle permet un contrôle des méthodes de calcul des taux de réaction (où interviennent le flux et les sections efficaces) dans des barreaux de compositions connues.

Le deuxième type d'expériences permet de suivre la cinétique de disparition des différents isotopes du gadolinium et de l'uranium pendant une irradiation et contribue aussi à tester les schémas de calcul employés.

Cette thèse se compose de deux parties principales :

- la première traite du gadolinium au temps zéro,

- la deuxième est consacrée à l'étude du gadolinium en évolution.

Tout d'abord, nous faisons l'état des connaissances sur le gadolinium et nous présentons les avantages de son utilisation comme poison consommable. Une étude sur le comportement du gadolinium permet de dégager les paramètres essentiels auxquels il est sensible. La partie la plus importante de ce travail est consacrée aux mesures par oscillations réalisées dans Minerve en 1981. La conception et la réalisation de cette campagne sont données. Les échantillons ont été regroupés en séries distinctes de manière à associer à chacune l'étude d'un paramètre précis (nature du support, charge en gadolinium, forme du gadolinium). On présente les résultats expérimentaux et les facteurs correctifs liés à l'interprétation. Au niveau du schéma de calcul, nous avons comparé plusieurs méthodes de traitement du crayon gadolinié lui-même d'une part, puis de son couplage avec le réseau extérieur d'autre part (options multicellules du code APOLLO).

L'interprétation des mesures est alors effectuée. Les écarts expérience - calcul sont analysés avec soin et on expose les tendances observées.

Pour compléter cette étude au temps zéro, il a paru utile de traiter des configuration avec grappes d'UO_2 - Gd_2O_3 de manière à voir l'effet de crayons UO_2 - Gd_2O_3 en interaction. Dans ce but, on a réalisé des mesures d'efficacité de grappes de crayons UO_2 - Gd_2O_3 dans le réseau Mélodie. On décrit la méthode expérimentale utilisée et les caractéristiques des grappes sont données en détail. On expose ensuite les résultats expérimentaux et une première analyse des tendances observées.

La deuxième partie de ce travail porte sur l'évolution du gadolinium. Deux points principaux sont abordés ici. Le premier concerne les mesures par oscillations d'échantillons "reconstitués" qui se composent de deux couronnes concentriques à enrichissements en ^{235}U et teneurs en gadolinium différents de manière à simuler du combustible UO_2 - Gd_2O_3 irradié. La définition des échantillons a été obtenue à l'aide d'un calcul d'évolution d'un crayon UO_2 - Gd_2O_3 dans un assemblage PWR. L'interprétation de ces mesures, faite comme pour les séries précédentes, est exposée ainsi que les écarts expérience-calcul.

Le deuxième point est consacré à la présentation de l'expérience GEDEON. Des crayons UO_2 - Gd_2O_3 seront irradiés dans un réseau 13 X 13 dont le spectre est représentatif de celui d'un PWR. Cette expérience se fera au centre du réacteur MELUSINE à Grenoble. On dresse d'abord un bilan des expériences d'irradiations de crayons UO_2 - Gd_2O_3 et des résultats obtenus. Le but et la philosophie de GEDEON sont exposés explicitement. On a réalisé l'étude de faisabilité neutronique de cette expérience, et l'amélioration des connaissances physiques que l'on peut en tirer a été analysée par une étude de sensibilité.

En conclusion, nous faisons la synthèse des tendances observées et nous indiquons l'orientation à suivre pour les expériences futures de qualification du gadolinium dans les réacteurs à eau pressurisée.

II. ETAT DE LA SITUATION SUR LE GADOLINIUM

1. - L'élément gadolinium

1.1 - Propriétés physiques et chimiques du gadolinium

Le gadolinium est un élément des terres rares (ou lanthanides). Parmi ceux-ci, il fait partie du groupe des terres yttriques. Il fut découvert en 1886 dans la gadoline (ou oxyde de gadolinium) par Mérignac et Lecoq de Boisbaudian.

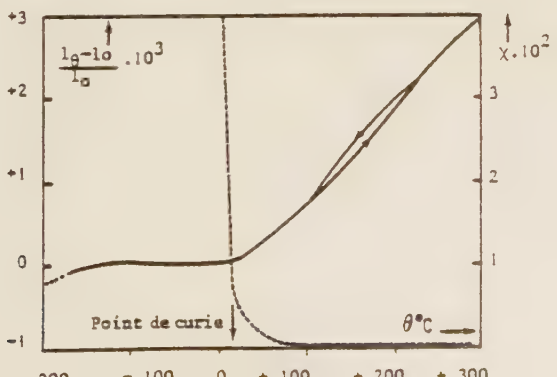
Dans le tableau périodique des éléments (voir ci-dessous), il se situe entre l'europium et le terbium ; il a pour numéro atomique Z = 64.

LANTHANIDES

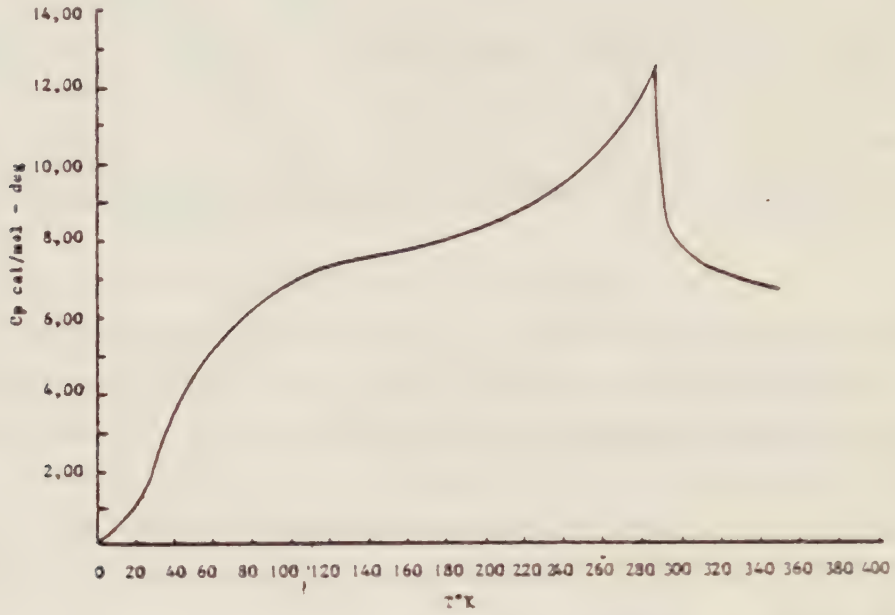
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Le gadolinium est un métal gris argent, brillant lorsqu'il n'est pas oxydé en surface, et qui peut se conserver à l'air assez longtemps sans s'altérer.

Le gadolinium métallique est connu sous une seul forme cristalline, hexagonale compacte. C'est un métal de dureté moyenne. On donne ci-dessous la courbe de dilatation thermique du gadolinium métallique entre la température de l'azote liquide et 300°C.



La courbe ci-dessous montre la variation de la chaleur spécifique du gadolinium entre 15 et 355 K.



Le tableau suivant rassemble quelques propriétés physiques (issues de /14/, /15/) du gadolinium métallique et de son oxyde Gd_2O_3.

	Gd (métallique)	Gd_2O_3
Masse moléculaire (g)	157,25	362,52
Densité	7,868	7,407
Température de fusion (ºC)	1350	2330
Température d'ébullition (ºC)	2700	-

On compte 25 isotopes (du ^{142}Gd au ^{164}Gd) mais on a seulement 7 isotopes stables dont le tableau suivant rassemble quelques caractéristiques :

Isotope	Pourcentage dans l'élément naturel (%)	Masse atomique (g)
Elément naturel	100	157,25
152	0,20	151,9195
154	2,15	153,9207
155	14,73	154,9208
156	20,47	156,0001
157	15,68	156,9240
158	24,87	158,0001
160	21,90	160,0001

1.2 - Données nucléaires de base

La bibliothèque à 99 groupes d'énergie du Code APOLLO, "APOLLIB", est élaborée en pondérant des données de base issues des bandes UKAEA ou ENDF sur les spectres de pondération suivants :

- une maxwellienne avec un maximum à $\frac{1}{40}$ eV pour le domaine thermique : $E < 0,1$ eV,
- un flux en $\frac{1}{E}$ pour le domaine du ralentissement : $0,1$ eV $< E <$ 1.3 MeV,
- un spectre de fission de la forme $\sqrt{E}\, e^{-E/1,29}$ dans le domaine rapide : $E > 1,3$ MeV.

Dans le tableau suivant, on donne les références concernant les données de base des différents isotopes du gadolinium actuellement disponibles dans la bibliothèque APOLLIB.

Isotope	Numéro d'identification	Origine	Date de mise en service
Gd naturel	156	ENDF/B-2 MAT 1030	Mars 1971
^{155}Gd	100155	ENDF/B-3 MAT 1252	27.03.75
	2170	DFN 170 Evaluation AAEC	Décembre 1971
^{156}Gd	2171	DFN 171 Evaluation AAEC	Décembre 1971
	3156	PF MAT 6456 Evaluation CNEN/CEA	23.05.79
^{157}Gd	100157	ENDF/B-3 MAT 1253	27.03.75
	200157	ENDF/B-4 MODIF MAT 794	Août 1977
	3157	PF MAT 6457 Evaluation CNEN/CEA	23.05.79
	2172	DFN 172 Evaluation AAEC	Décembre 1971
^{158}Gd	2173	DFN 173 Evaluation AAEC	Décembre 1971
^{159}Gd	2174	DFN 174 Evaluation AAEC	Décembre 1971
^{160}Gd	2175	DFN 175 Evaluation AAEC	Décembre 1971

Avec les notations :

AAEC : Australian Atomic Energy Commission (COOK 1970)

DFN : Numéro de fichier dans la bibliothèque UKNDL, ou bien numéro de matériel (MAT) dans ENDF/B.

ENDF/B-3 : 3ème édition de la bibliothèque ENDF/B.

Les isotopes du gadolinium recommandés aujourd'hui /16/ pour le calcul des réacteurs à eau sont les suivants :

Isotope	155	156	157	158	159	160
nº APOLLIB	100155	2171	200157	2173	2174	2175

Pour chacun de ces isotopes, on présente dans le tableau ci-dessous les constantes neutroniques importantes (exprimées en barns) qui sont :

- la section efficace à 2200 m/s : σ_o,
- la section efficace effective dans le domaine thermique : σ_{th},
- l'intégrale de résonance pour une énergie de coupure de 0,5 eV : I_R.

Nº APOLLIB	σ_o	σ_{th}	I_R
100155	61000	51500	1516*
2171	6,2	6,2	120.8
200157	255000	217000	723.*
2173	2,7	2,7	98.1
2174	16,4	16,3	186,8
2175	0,73	0,73	1,5

(*) L'utilisation des isotopes effectifs recommandés 1155 et 1157 conduit à des valeurs de I_R égales à 1305 barns et 589 barns respectivement.

Les paramètres des résonances dans le domaine thermique (E < 0,625 eV) sont les suivants :

Isotope	E_σ (eV)	Γ (meV)	$2g\,\Gamma_n$ (meV)	J	Γ_γ (meV)	$2g\,\Gamma_n^o$ (meV)
155	0,0268±0,0002	108 ± 1	0,130±0,002	2	108 ± 1	0,794±0,012
157	0,0314±0,002	-	0,59 ±0,01	-	106 ± 1	3,33 ± 0,06

On donne dans les figures 1 à 3 les variations des sections efficaces d'absorption des principaux isotopes du gadolinium.

2. - Le gadolinium en tant que poison consommable

2.1 - L'emploi du gadolinium dans les réacteurs à eau pressurisé

Dans la gamme d'absorbants connus à l'heure actuelle, un petit nombre seulement requiert les conditions nécessaires pour être employé comme poison consommable. En effet, les éléments choisis doivent satisfaire aux critères suivants :

a) forte absorption dans le domaine thermique,

b) usure du poison corrélée à l'évolution du combustible et capture résiduelle faible,

c) mise en place dans le réseau ne diminuant pas trop la densité de puissance et évitant l'apparition de "points chauds",

d) bonne tenue métallurgique : stabilité à la fois chimique et géométrique aux effets de la chaleur et du rayonnement,

e) bonne conductivité calorifique permettant d'évacuer les calories par le réfrigérant,

f) retraitement facile,

g) réduire, du point de vue de la sûreté, les effets "parasites" dûs à l'utilisation du bore,

h) un prix raisonnable, fonction d'un approvisionnement et d'une préparation relativement aisés.

Nous allons développer certains des points évoqués ci-dessus ; quand cela sera possible, nous ferons la comparaison entre le gadolinium et le borosilicate employé habituellement dans les PWR.

Le gadolinium répond bien au critère a). Il possède deux isotopes ayant des sections d'absorption extrêmement élevées : ^{155}Gd et ^{157}Gd dont l'abondance totale s'élève à un peu plus de 30 % en nombre de noyaux. Leur vitesse de disparition est élevée et les produits de la capture de ces deux isotopes, c'est-à-dire ^{156}Gd et ^{158}Gd ne sont pratiquement pas absorbants, ce qui assure la décroissance de la capture du gadolinium en cours d'évolution. Il est important que les isotopes stables du gadolinium disparaissent par réaction (n, γ) : en effet, il est préférable que "le poison" réagisse avec les neutrons par capture suivie d'émission d'un rayonnement plutôt que par émission de particules. En particulier, les réactions (n, α) ont pour résultat des effets nocifs de déformation, gonflement et fragilité sur les gaines et les crayons combustibles.

Le critère b) est mieux respecté par le gadolinium que par le pyrex. En effet, le gadolinium présente une grande souplesse d'utilisation ; on peut l'introduire dans des crayons combustibles sous forme cobroyée ou sous forme de grains. Avec cette dernière présentation, on peut jouer sur la vitesse de disparition du gadolinium et compenser ainsi la perte de réactivité liée à l'usure du combustible. Ceci est un avantage par rapport au pyrex dont la vitesse de disparition est fixe dans un environnement donné. Par ailleurs, le pyrex nécessite, pour sa mise en place dans les assemblages des structures particulières qui augmentent la capture résiduelle du poison. Ce problème est annihilé par l'introduction du gadolinium au sein même de crayons combustibles. D'autre part, le gadolinium permettant une plus grande réserve de réactivité et une utilisation plus facile que le borosilicate, on peut allonger les cycles actuels et réaliser ainsi une économie de combustible.

Le gadolinium présente, pour le point c) un net avantage par rapport au borosilicate. Cette dernière solution impose l'utilisation d'un grand nombre de crayons empoisonnés si l'on veut compenser un excédent important de réactivité. Ces crayons seront alors mis à la place de crayons combustibles, ce qui diminuera d'autant la densité de puissance. Le gadolinium peut être introduit dans un certain nombre de crayons combustibles et ceci permet de récupérer la puissance dégagée

par ces crayons après l'usure du gadolinium. La densité de puissance est nettement améliorée en veillant, toutefois, à choisir un enrichissement en ^{235}U "adéquate" pour le crayon combustible contenant le poison, de manière à éviter la formation de points chauds.

Le gadolinium est parfaitement adapté aux critères d), e), et f).

Le gadolinium puise un grand intérêt dans le point g). En début de cycle, la concentration en bore soluble est limitée afin de ne pas conduire à un coefficient de température positif. L'excédent de réactivité initial est compensé par les poisons consommables. En jouant sur les différents paramètres du gadolinium (charge, nature, emplacement), on peut diminuer la concentration initiale en bore dans le modérateur et rendre celle-ci plus constante tout au long du cycle. On obtient ainsi un coefficient de température encore plus négatif et les injections d'acide borique en cas d'incident sont d'autant plus efficaces. A noter aussi que le contrôle de la concentration en bore nécessite un système compliqué de mesures chimiques et le traitement d'une grande quantité d'effluents. Ceci est pénalisant car, pour compenser les pertes de réactivité liées à l'usure du combustible et à l'apparition des produits de fission, on procède à de nombreuses dilutions qui présentent un risque (puisqu'il y a injection d'eau dans le réacteur) rendu minimal par les opérateurs, mais qui existe cependant.

Par ailleurs, comme l'emploi du gadolinium permet une concentration en bore plus faible et plus constante au long d'un cycle, la production de tritium dans le circuit primaire est alors diminuée. On rappelle que l'apparition du tritium dans le circuit primaire est due d'une part à la capture neutronique du lithium créé par la réaction ^{10}B (n,α) et d'autre part aux fissions ternaires des isotopes fissiles (le tritium produit diffuse au travers des gaines des crayons combustibles). Les réactions ^{10}B (n,α) créatrices de particules α particulièrement destructives sont également moins nombreuses.

L'allongement des cycles permettant des rechargements moins fréquents, on a donc, pour une même production d'énergie, un temps de manutention moins grand et des doses radioactives moins fortes pour les opérateurs. La stratégie de déchargement est différente pour les assem-

blages avec des grappes U-Gd de celle employée pour les assemblages avec grappes de pyrex. Après l'irradiation d'un cycle, les grappes U-Gd restent dans les assemblages et ceci évite d'avoir à manutentionner des grappes de poisons consommables comme dans le cas de grappes de pyrex. Le retraitement d'un assemblage avec U-Gd est analogue à celui d'un assemblage standard mais entraîne cependant quelques difficultés en augmentant le volume des déchets.

Au niveau approvisionnement (point h), le gadolinium est présent dans le minerai appelé "gadolinite". C'est un silicate de terres yttriques qui n'est pas très répandu mais localisé en quantités très importantes dans quelques gisements particulièrement riches (Texas, Suède, Norvège, Finlande, Allemagne, Canada, Australie, Japon). On trouve également du gadolinium dans le soleil et les étoiles, avec des proportions massiques différentes, comme le montre le tableau ci-dessous.

ELEMENTS	NUMERO ATOMIQUE	g POUR 1000 Kg DE ROCHES	POIDS POUR 100 PARTIES DE Si	ATOME POUR 100 ATOMES DE Al	ATOMES POUR 100 ATOMES DE Si		
					Terre	Soleil	Météo-rites
Scandium	21	5	0,0018	-	0,0011	0,0052	0,0015
Yttrium	39	28,1	0,00972	0,00949	0,00307	0,00015	0,000974
Lanthane	57	18,3	0,00633	0,00396	0,00128	0,00003	0,000208
Cérium	58	46,1	0,01600	0,00992	0,0032	0,00013	0,000232
Praséodyme	59	5,53	0,00191	0,00120	0,000389	0,000003	0,0000964
Néodyme	60	23,9	0,00827	0,00501	0,00162	0,00005	0,000331
Samarium	62	6,47	0,00224	0,00129	0,000419	0,000025	0,000115
Europium	63	1,06	0,000367	0,000210	0,000068	0,000012	0,000028
Gadolinium	64	6,36	0,00220	0,00122	0,000394	0,000006	0,000165
Terbium	65	0,91	0,000915	0,000173	0,000056	détecté *	0,000052
Dysprosium	66	4,47	0,00155	0,000832	0,000269	0,000015	0,000203
Holmium	67	1,15	0,000398	0,000219	0,000068	-	0,000057
Erbium	68	2,47	0,000855	0,000445	0,000144	0,0000005	0,000163
Thulium	69	0,20	0,000069	0,0000355	0,0000115	détecté *	0,000029
Ytterbium	70	2,66	0,000920	0,000461	0,000149	détecté *	0,000150
Lutétium	71	0,75	0,000228	0,000114	0,000037	détecté *	0,000048

(*) Tb, Tm, Yb et Lu ont été détectés par E. C. MOORE

Quelques minerais de terres rares sont actuellement exploités industriellement. En règle générale, l'attaque des minerais de terres rares ne présentent pas de difficulté majeure, mais il faut faire appel à des procédés différents suivant la composition du minerai auquel on s'adresse. Citons les attaques par les acides (chlorhydrique, nitrique, sulfurique, fluorhydrique) concentrés à chaud, les traitements alcalins (carbonate de soude) et la fusion.

2.2 - Etude paramétrique de l'efficacité du gadolinium en fonction du poison lui-même et des propriétés neutroniques du réseau extérieur

2.2.1 - Objectif de l'étude

Le but de cette étude est la détermination des paramètres neutroniques importants pour l'efficacité du gadolinium. Cette étude est menée uniquement au temps zéro.

La situation traitée est un motif multicellules 9 x 9 contenant au centre un crayon gadolinié (Cf. figure 4a). Les caractéristiques des cellules composant ce motif sont données sur la figure 4b, et correspondent à l'expérience GEDEON (Voir partie VII) représentative d'un PWR.

Nous avons choisi comme référence le calcul avec un crayon gadolinié d'UO_2 enrichi à 3 % en ^{235}U et comportant 3 % de Gd_2O_3 sous forme cobroyée. Le réseau extérieur est constitué de crayons UO_2 enrichis à 3 % en ^{235}U.

Dans le tableau 1, nous donnons le plan de l'étude. Nous avons dissocié les paramètres neutroniques du crayon gadolinié de ceux du réseau UO_2.

Nous étudierons successivement les points suivants :

- Pour le crayon gadolinié

  - l'effet du support (UO_2 ou Al_2O_3),
  - l'effet de l'enrichissement en U^{235} dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3,
  - l'effet de la teneur en Gd_2O_3.

- Pour le réseau extérieur

  - l'effet de l'enrichissement en ^{235}U,
  - l'effet du rapport de modération.

2.2.2 - Paramètres du crayon gadolinié

a) Effet du support

Parmi les nombreux supports sur lequel on peut introduire l'oxyde de gadolinium, nous avons choisi les deux supports les plus usités à savoir :

- l'alumine (support inerte),
- l'UO_2 (c'est le cas référence).

Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus sur les 4 macrogroupes habituels (Cf. tableau 2).

SUPPORT	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}$ Total	$\frac{(\Sigma\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}$ gr1	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}$ gr2	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}$ gr3	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}$ gr4
Al_2O_3	1,9778	0,0041	0,0716	0,4072	3,0647
UO_2 3%	1,9095	0,0042	0,0718	0,3853	2,9650

L'efficacité du gadolinium augmente de 4 % en passant d'un support UO_2 (3 %) à un support inerte. Cet accroissement se manifeste en grande partie dans le domaine épithermique : en effet, dans le cas du support UO_2, l'absorption résonante de l'^{235}U et de l'^{238}U crée un effet d'ombre sur la capture épithermique du gadolinium.

Le tableau ci-dessous montre la répartition de l'absorption pour chaque type de support :

Isotope i	Support Al_2O_3 $(\Sigma a\phi)_i/(\Sigma a\phi)$total(%)	Support UO_2 $(\Sigma a\phi)_i/(\Sigma a\phi)$total(%)
^{155}Gd	20,61	17,11
^{157}Gd	76,94	64,19
^{235}U	-	7,72
^{238}U	-	10,91

Le gadolinium représente plus de 81 % en absorption dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3. Par domaine d'énergie, on a la décomposition suivante :

ISOTOPE i	$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ gr1	$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ gr2	$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ gr3	$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ gr4
^{155}Gd	0,005	0,07	3,34	13,70
^{157}Gd	0,004	0,07	1,62	62,50
^{235}U	0,14	0,37	4,25	2,96
^{235}U	1,56	1,32	7,58	0,45

Dans le domaine rapide, une absorption non négligeable est engendrée par la présence de l'^{238}U (celle du groupe 1, d'énergie supérieure à 1 MeV a un rôle positif car elle correspond aux fissions rapides). Dans le domaine épithermique, l'absorption du gadolinium représente 70 % de l'absorption totale (contre 30 % pour l'UO_2) et 96 % dans

le domaine thermique (contre 4 % pour l'UO_2). En conséquence, toute modification de spectre apportée par divers facteurs (rapport de modération, enrichissement en ^{235}U du réseau) entraînera une redistribution de l'absorption entre l'uranium et le gadolinium.

Du fait de la capture résonante de l'^{238}U, le support en UO_2 avec l'enrichissement de 3 % considéré ici, rend le poison plus antiréactif que le support inerte : le gain d'effet en réactivité de l'UO_2 - Gd_2O_3 par rapport à l'Al_2O_3 - Gd_2O_3 est de 2.5 %.

b) Effet de l'enrichissement en ^{235}U

Comme nous venons de le voir, il existe une compétition dans certains groupes d'énergie entre les isotopes de l'uranium et ceux du gadolinium.

Nous allons maintenant nous intéresser à l'effet de l'enrichissement en ^{235}U dans le crayon UO_2-Gd_2O_3. Nous avons choisi une gamme d'enrichissements allant de 0.72 % à 5.1 %. La charge en Gd_2O_3 reste égale à 300 mg/cm3.

Au niveau du crayon UO_2-Gd_2O_3, on obtient :

Enrichissement en ^{235}U (%)	$\frac{(\Sigma a\phi)cell}{(\Sigma a\phi)cell4}_{total}$	$\frac{(\Sigma a\phi)cell}{(\Sigma a\phi)cell4}_{gr1}$	$\frac{(\Sigma a\phi)cell}{(\Sigma a\phi)cell4}_{gr2}$	$\frac{(\Sigma a\phi)cell}{(\Sigma a\phi)cell4}_{gr3}$	$\frac{(\Sigma a\phi)cell}{(\Sigma a\phi)cell4}_{gr4}$
0,72	2,2948	0,8206	0,8764	1,1132	3,1117
2,50	2,3685	0,8626	0,9836	1,2882	3,1352
3,00	2,3886	0,8744	1,0139	1,3365	3,1414
5,10	2,4720	0,9244	1,1415	1,5355	3,1666

L'accroissement de l'enrichissement en ^{235}U conduit à une augmentation de l'absorption du crayon UO_2 - Gd_2O_3 : 7.7 % quand on fait varier l'enrichissement en ^{235}U de 0.72 % à 5.10 %.

Le tableau ci-dessous présente la perte d'efficacité du gadolinium lui-même (effet de "protection" de l'^{235}U) ; cet effet atteint 3.4 %.

Enrichissement en ^{235}U (%)	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}^{total}$	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}^{gr1}$	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}^{gr2}$	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}^{gr3}$	$\frac{(\Sigma a\phi)Gd}{(\Sigma a\phi)ce\ell 4}^{gr4}$
0,72	1,9450	0,0041	0,0716	0,3901	3,0206
2,50	1,9172	0,0042	0,0718	0.3863	2,9770
3,00	1,9095	0,0042	0,0718	0,3853	2,9650
5,10	1,8787	0,0043	0,0720	0,3811	2,9165

Les contributions en absorption (en %) des différents isotopes i à l'absorption du crayon gadolinié sont les suivantes :

Enrichissement en ^{235}U (%)	$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ groupe 1				$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ groupe 2				$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ groupe 3				$\frac{(\Sigma a\phi)_i}{(\Sigma a\phi)tot}$ groupe 4			
	^{155}Gd	^{157}Gd	^{8}U	^{5}U	^{155}Gd	^{157}Gd	^{8}U	^{5}U	^{155}Gd	^{157}Gd	^{8}U	^{5}U	^{155}Gd	^{157}Gd	^{8}U	^{5}U
0,72	0,005	0,004	1,62	0,03	0,071	0,069	1,40	0,09	3,51	1,71	8,18	1,08	14,55	66,34	0,49	0,76
2,50	0,005	0,004	1,57	0,11	0,069	0,067	1,34	0,31	3,37	1,64	7,71	3,59	13,88	63,30	0,46	2,50
3,00	0,005	0,004	1,56	0,14	0,068	0,067	1,32	0,37	3,34	1,62	7,58	4,25	13,70	62,50	0,45	2,96
5,10	0,005	0,004	1,51	0,23	0,066	0,065	1,25	0,61	3,19	1,55	7,08	6,88	13,01	59,36	0,41	4,71

Au niveau du K_∞ de la cellule gadoliniée, on obtient :

Enrichissement en ^{235}U (%)	0,72	2,50	3,00	5,10
k_∞ cellule	0,07405	0,15352	0,17449	0,25679

Même avec un enrichissement de 5.1 % en ^{235}U, le k_∞ de la cellule gadoliniée est faible (0,25679) et son accroissement en fonction de l'enrichissement en ^{235}U diminue. Une partie non négligeable est liée à la fission rapide de l'^{238}U comme le montre le cas correspondant à l'U naturel.

La variation de l'antiréactivité, introduite par le poison, avec l'enrichissement en ^{235}U est la suivante (par rapport au support Al_2O_3) :

Enrichissement en ^{235}U (%)	0,72	2,50	3,00	5,10
Variation de l'antiréactivité (%)	+ 5,86	+ 3,21	+ 2,46	- 0,50

La puissance (normalisée) dégagée dans le crayon gadolinié au temps zéro est la suivante :

Enrichissement en ^{235}U (%)	0,72	2,5	3,0	5,10
$\frac{P(UO_2 - Gd_2O_3)}{P(UO_2 \text{ cel } 4)}$	+ 0,12	+ 0,27	+ 0,31	+ 0,47

c) Effet de la teneur en Gd_2O_3

Nous avons fait varier la teneur en Gd_2O_3 dans la gamme rencontrée dans les projets (3 à 8 %) : on déprime ainsi de plus en plus le flux thermique dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3, alors que la capture épithermique n'étant pas encore saturée, le flux du groupe 3 est peu perturbé (Cf. tableau ci-dessous).

Teneur en Gd_2O_3 (%)	3,0	4,5	6,0	8,0
$\frac{\phi 1}{\phi t}$ (%)	24,84	24,91	24,96	25,03
$\frac{\phi 2}{\phi t}$ (%)	39,44	39,61	39,74	39,87
$\frac{\phi 3}{\phi t}$ (%)	28,15	28,19	28,19	28,17
$\frac{\phi 4}{\phi t}$ (%)	7,56	7,29	7,11	6,93

$\phi t = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$.

On vérifie en effet ci-dessous que la capture thermique est presque saturée alors que la capture augmente fortement dans les groupes rapides et presque proportionnellement à la concentration en gadolinuim.

Teneur en Gd_2O_3 (%)	$\frac{(\Sigma a\phi)\ Gd}{(\Sigma a\phi) ce\ell 4}^{total}$	$\frac{(\Sigma a\phi)\ Gd}{(\Sigma a\phi) ce\ell 4}^{gr1}$	$\frac{(\Sigma a\phi)\ Gd}{(\Sigma a\phi) ce\ell 4}^{gr2}$	$\frac{(\Sigma a\phi)\ Gd}{(\Sigma a\phi) ce\ell 4}^{gr3}$	$\frac{(\Sigma a\phi)\ Gd}{(\Sigma a\phi) ce\ell 4}^{gr4}$
3,0	1,9095	0,0042	0,0718	0,3853	2,9650
4,5	2,0331	0,0063	0,1076	0,5448	3,0882
6,0	2,1262	0,0084	0,1433	0,6904	3,1679
8,0	2,2284	0,0112	0,1909	0,8769	3,2411

La capture résonante du gadolinium devient supérieure à celle de l'^{238}U pour une charge de 6 % en Gd_2O_3.

2.2.3 - Paramètres du réseau extérieur

Les paramètres fondamentaux sont l'enrichissement en ^{235}U du réseau extérieur et le rapport de modération (V_{H2O}/Vu).

a) Effet de l'enrichissement en ^{235}U

Nous avons choisi une gamme d'enrichissement en ^{235}U variant de 2.5 à 5.1 %. La variation de ce paramètre conduit à une modification du spectre dans la cellule poison comme le montre le tableau suivant :

Enrichissement en ^{235}U du réseau ext. (%)		2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	5,1
$\frac{\phi 1}{\phi t}$	(%)	24,53	24,68	24,84	24,92	25,05	25,59
$\frac{\phi 2}{\phi t}$	(%)	39,09	39,31	39,44	39,57	39,75	40,51
$\frac{\phi 3}{\phi t}$	(%)	28,17	28,19	28,15	28,15	28,14	28,01
$\frac{\phi 4}{\phi t}$	(%)	8,21	7,82	7,56	7,35	7,06	5,89

$$\emptyset t = \emptyset_1 + \emptyset_2 + \emptyset_3 + \emptyset_4$$

La variation des paramètres synthétiques de la cellule poison est la suivante :

Enrichissement en ^{235}U du réseau extérieur (%)	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	5,1
k_∞ cellule UO_2 - Gd_2O_3	0,14731	0,15352	0,17449	0,17857	0,18443	0,21113
Variation de l'antiréactivité (%)	+ 11,8	+ 5,0	0	- 3,6	- 8,5	- 27,3

Le durcissement du spectre du réseau avec son enrichissement conduit à une diminution de l'efficacité des poisons gadoliniés, le gadolinium étant un poison essentiellement thermique.

b) Effet du rapport de modération

On obtient les résultats suivants :

Rapport de modération = $\frac{VH_2O}{VU}$	PWR à chaud 1,30	1,42	1,60	PWR à froid 1,78	1,95	2,13
$\frac{\phi 1}{\phi t}$ (%)	24,67	24,73	24,79	24,84	24,87	24,89
$\frac{\phi 2}{\phi t}$ (%)	42,13	41,34	40,32	39,44	38,67	37,99
$\frac{\phi 3}{\phi t}$ (%)	27,53	27,76	28,00	28,15	28,25	28,31
$\frac{\phi 4}{\phi t}$ (%)	5,67	6,18	6,89	7,56	8,21	8,82
k_∞ cellule U-Gd	0,21193	0,20030	0,18613	0,17449	0,16470	0,15636
Variation de l'antiréactivité (%)	- 4,5	- 2,8	- 1,1	0	+ 0,7	1,0

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$$

Le poison devient de plus en plus efficace avec le rapport de modération ; cependant l'effet lié à des variations réalisables de ce paramètre est faible devant l'effet potentiel lié à l'enrichissement du réseau.

2.2.4 - Conclusion

Cette étude a permis de quantifier l'importance des paramètres fondamentaux du réseau sur l'antiréactivité introduite par l'insertion d'un poison au gadolinium : l'efficacité de l'absorbant décroît fortement avec le durcissement du spectre engendré par un accroissement de l'enrichissement en ^{235}U ou de la sous-modération de l'assemblage.

Nous avons montré que le paramètre essentiel définissant un poison gadolinié était sa charge en gadolinium (mg/cm3) ; l'effet du support joue peu sur l'antiréactivité introduite. Le support UO_2, d'une part, accroît l'efficacité du poison par la capture résonante de l'^{238}U (+ 7 %) et d'autre part joue un rôle réactif par la présence du corps fissile ^{235}U. L'équilibre entre ces deux effets antagonistes est obtenu pour un enrichissement en ^{235}U compris entre 4 et 5 % : l'UO_2 - Gd_2O_3 devient alors équivalent à l'Al_2O_3 - Gd_2O_3 du point de vue du bilan en réactivité.

III. ETUDE DU GADOLINIUM AU TEMPS ZERO : EXPERIENCE MELODIE IV

III.1 - But de l'expérience

Parmi les techniques expérimentales actuellement utilisées pour la détermination de sections efficaces, on peut distinguer :

- la méthode de mesures par oscillations,
- la méthode par analyses,
- les mesures par activation.

Les deux dernières méthodes font appel à des expérimentations assez difficiles à mettre en oeuvre pour un nombre de résultats limité.

La technique de mesures par oscillations présente une grande souplesse d'utilisation. Elle est basée sur la mesure des perturbations créées par le remplacement d'un élément du réseau expérimental par un élément de nature différente. Son premier intérêt est de mettre en oeuvre une faible quantité du matériau que l'on veut étudier. D'autre part, ce sont des mesures relatives qui permettent souvent de s'affranchir de certains paramètres mal connus en absolu et aussi d'atteindre directement des modifications intervenant dans le coeur d'un réacteur nucléaire (mesures sur combustible irradié par exemple).

Bien qu'on disposait de quelques résultats de mesures par oscillations, il était nécessaire de procéder à de nouvelles campagnes afin de qualifier les données nucléaires de base du gadolinium. L'objectif de ces mesures est de réaliser une étude paramétrique complète en fonction de la nature du support (alumine ou oxyde d'uranium), de la charge en gadolinium et de sa forme (cobroyée ou en grains de différents diamètres). En jouant astucieusement sur ces trois paramètres, il est possible de décrire de nombreuses combinaisons et ainsi tester les méthodes de calcul associées.

Une étude complète nécessite également de faire des mesures sur des crayons gadoliniés en interaction ou des interactions trous d'eau - crayon gadolinié. Dans cette optique, on a procédé à des mesures d'antiréactivité de trois grappes constituées chacune de neuf crayons

UO_2 - Gd_2O_3, placées au centre du réacteur MINERVE. Ces grappes sont différentes soit par leur enrichissement en ^{235}U soit par la charge ou la forme du gadolinium (cobroyé ou en grains).

Nous n'avons pas traité le cas de crayons gadoliniés en interaction avec des trous d'eau.

III.2 REALISATION DE L'EXPERIENCE MELODIE IV DANS LE REACTEUR MINERVE

III.2.1 - Description de l'assemblage

III.2.1.1 - Généralités

MINERVE est une pile expérimentale destinée essentiellement aux études neutroniques. Implantée en 1959 au Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses, elle a été transférée en 1977 sur le Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache.

Elle est de type piscine, comprenant une zone nourricière constituée d'éléments à plaques d'uranium fortement enrichi et un réflecteur extérieur en graphite /17/, /18/.

Le coeur, de puissance très faible (< 100 Watts), est immergé sous trois mètres d'eau. Les éléments combustibles et les réflecteurs sont disposés sur 4 grilles mobiles permettant de dégager au centre du réacteur une cavité carrée de dimension variable.

A l'intérieur de cette cavité sont placés les différents réseaux expérimentaux sous-critiques étudiés. On réalise ainsi des assemblages couplés.

Les mesures sont effectuées dans la partie centrale de ces réseaux.

Les éléments de contrôle (barres de contrôle et de sécurité, chambres de contrôle) et le pilote automatique permettant de mesurer les variations de réactivité lors de mesures par oscillations et de maintenir très stable la puissance du réacteur, sont placés dans la zone nourricière ou le réflecteur, c'est-à-dire hors de la zone de mesure.

III.2.1.2 - L'assemblage MELODIE IV

L'assemblage MELODIE est un assemblage couplé thermique-thermique.

Dans cette configuration, les 4 grilles mobiles supportant les éléments de la zone nourricière sont écartées pour dégager une cavité centrale de 740 mm de côté environ.

Au centre de cette cavité est placée une cuve cylindrique en aluminium de 715 mm de diamètre intérieur et de 10 mm d'épaisseur.

Des coins en aluminium permettent de passer de la géométrie cylindrique de la cuve à la géométrie carrée de la cavité. Dans chaque angle de ces éléments on a ménagé une encoche pour permettre la mise en place d'un élément combustible (cylindrisation de la zone nourricière) ou d'un bloc de graphite.

A l'intérieur de la cuve se trouve le massif MELODIE de 712 mm de diamètre et de 858 mm de hauteur.

Il se compose d'un réseau de 801 cellules entourées de blocs d'aluminium.

III.2.1.3 - Description de la zone thermique nourricière

III.2.1.3.1 - Eléments combustibles

Les éléments combustibles sont des éléments MTR du type SILOE à plaques planes.

Le combustible se présente sous forme de lames d'alliage d'aluminium-uranium enrichi à 90 % ou 93 % en ^{235}U. Des éléments à 18, 12 et 9 plaques sont utilisés.

On trouve également 4 éléments de contrôle destinés à recevoir les barres absorbantes (barres fourchettes en Hf). Les éléments contiennent 12 plaques d'aluminium-uranium enrichi à 93 %.

Dans ces éléments, 6 plaques (3, 4, 5 et 14, 15, 16) d'un élément standard sont remplacées par 2 plaques d'aluminium et un emplacement laissé libre pour permettre l'introduction d'une plaque d'hafnium.

Tous ces éléments ont une section de 80 x 76.1 mm^2. Ils comportent à leur partie inférieure un embout cylindrique d'aluminium permettant de les ficher en position verticale dans une plaque épaisse d'aluminium, appelée grille, percée d'un réseau de trous à pas rectangulaire (pas des trous : 81 x 77.1 mm^2 ; il correspond à un espacement moyen entre éléments combustibles de 1 mm).

La hauteur de la partie combustible est de 600 mm environ.

III.2.1.3.2 - Barres absorbantes de contrôle

Elles sont du type fourchette. Chaque barre se compose de deux lames absorbantes en hafnium de 4,4 mm d'épaisseur et de 626 mm de longueur.

III.2.1.3.3 - Le réflecteur

Il est constitué par des blocs de graphite de différentes tailles gainés en aluminium :

- des gros blocs placés à l'extérieur de chaque face du réacteur, ainsi qu'à chaque angle. Ils constituent le réflecteur extérieur.

- des petits blocs de mêmes dimensions extérieures que les éléments combustibles avec, à leur partie inférieure, des embouts cylindriques pleins en aluminium venant prendre position dans les trous de la grille.
  Ils sont destinés à combler les vides entre les éléments combustibles et le réflecteur extérieur.

III.2.1.4 - Description du massif MELODIE IV

III.2.1.4.1 - Le massif

Le massif MELODIE IV est formé d'un réseau de 801 cellules constituant la zone d'étude, entouré de blocs d'aluminium.

La zone de mesure est réalisée par une grille inférieure et une grille supérieure en aluminium, distantes de 795 mm.

Radialement, des blocs d'aluminium, tournés extérieurement pour former un cylindre de 712 mm de diamètre, entourent la zone de mesure.

Le massif est placé dans la cuve en aluminium à une hauteur telle que les plans médians des combustibles de la zone d'étude et de la zone nourricière coïncident.

Une coupe horizontale et une coupe verticale de l'assemblage MELODIE IV sont données sur les figures 5a et 5b.

III.2.1.4.2 - Le réseau

Le réseau central comporte 801 cellules au pas de 1,26 cm. Il forme sensiblement un cylindre de 40 cm de diamètre.

Une surgaine d'aluminium de 9,7 mm de diamètre intérieur et de 11,0 mm de diamètre extérieur est placée dans chaque cellule. Elle permet de diminuer la quantité de modérateur (eau déminéralisée) qui baigne l'ensemble et d'obtenir un rapport de modération ($V_{H_2O}/V_{Combustible} = 1.35$) voisin de celui d'un réacteur PWR Type 17 x 17 à chaud (compte tenu de la diminution de la densité de H_2O).

A l'intérieur de la surgaine, on peut mettre un crayon combustible UO_2, un crayon combustible UO_2-Gd_2O_3, un crayon d'aluminium ou bien le trou est laissé libre et est alors rempli par de l'eau.

On donne sur la figure 6a, une coupe horizontale du réseau. Les 60 cellules périphériques sont constituées de rondins en aluminium afin que le réseau expérimental soit nettement sous-critique.

III.2.1.4.3 - Les crayons combustibles et absorbants

III.2.1.4.3.1 - Crayons UO_2

Les crayons d'oxyde d'uranium sont constitués par des pastilles d'UO_2 fritté de diamètre 7,05 mm, de hauteur 100 mm et de densité voisine de 10.1.

L'enrichissement en ^{235}U est de 3.5 %.

Ces pastilles sont entourées d'un prégainage en aluminium de 0.10 mm d'épaisseur.

La hauteur de la colonne fissile est de 600 mm.

La coupe horizontale d'une cellule du réseau MELODIE IV avec combustible UO_2 à 3.5 % est présentée à la figure 7a. La figure 8 donne une coupe longitudinale d'une aiguille combustible.

On donne dans le tableau 3 les principaux paramètres neutroniques de la cellule calculée en mode fondamental, comparés à ceux d'un réacteur PWR à 300°C (enrichissement combustible : 3.5 %).

III.2.1.4.3.2 - Crayons absorbants

Ce sont des crayons d'UO_2-Gd_2O_3 ou de pyrex. Par rapport aux crayons précédents, on a seulement substitué le combustible UO_2 par du combustible UO_2 - Gd_2O_3 ou du pyrex dont les caractéristiques sont données plus loin.

III.2.2 - Méthodes de mesures

III.2.2.1 - Mesures par oscillations

a) La technique de mesures par oscillations

La méthode de mesures par oscillations consiste à provoquer des petites perturbations périodiques de certaines propriétés neutroniques dans un réacteur critique. Expérimentalement, on enlève périodiquement les matériaux d'une ou plusieurs cellules de la zone centrale du réacteur et on les remplace par des matériaux différents. Ce changement des caractéristiques des matériaux dans le point central du réacteur provoque l'existence d'une perturbation globale du flux sur l'ensemble du réacteur. Cette perturbation n'entraîne qu'une variation du niveau de la population neutronique du réacteur.

Elle est sensible à l'importance des neutrons dans la zone perturbée, à la variation des taux de production et d'absorption et du réacteur considéré.

On a également une perturbation locale de flux qui diminue très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone perturbée. Elle se traduit par une variation du niveau et de la forme du flux en fonction de l'énergie et dépend essentiellement des modifications de la structure fine des taux de réaction dans la zone perturbée.

b) Conception et réalisation des échantillons d'oscillation en fonction des paramètres neutroniques à étudier

Il a été nécessaire de constituer des séries relatives chacune à un paramètre neutronique à étudier. Les trois paramètres que nous avons retenus sont :

- la nature du support : il s'agit ici de l'alumine ou de l'oxyde d'uranium,

et ensuite, pour chaque type de support :

- la charge en gadolinium,
- la forme du gadolinium : cobroyée ou en grains de différents diamètres.

Nous donnons maintenant la description des différentes séries sélectionnées.

Tous les échantillons ont une hauteur de 45.5 mm sauf ceux de la série F dont la hauteur est de 161.5 mm. Le tube de gainage, de diamètre 8.4 x 9.6 mm, est en zircaloy, avec à chaque extrémité un bouchon soudé ou démontable, également en zircaloy. A l'intérieur de ce tube, on trouve un empilement de 3 pastilles ou plus d'Al_2O_3 -Gd_2O_3, ou d'UO_2 - Gd_2O_3. Le calage axial des pastilles et leur centrage par rapport aux extrémités du gainage est assuré par des cales tubulaires en zircaloy de diamètre 6.5 x 8.0 mm.

On trouve toutes les caractéristiques des échantillons dans les tableaux 4 à 7 et sur la figure 9.

c) Déroulement des mesures par oscillations

L'oscillateur de MINERVE est un oscillateur vertical du type asservi qui permet d'imprimer à un échantillon un mouvement périodique.

Pour ces expériences ce mouvement est de type pseudo-carré avec une période de 60 secondes ; l'amplitude totale de l'oscillation est de 700 mm (échantillon alternativement au centre du coeur (état perturbé) et hors de celui-ci (état non perturbé)).

Nous avons fait des mesures de 30 cycles d'oscillations. Les échantillons sont placés dans une canne d'oscillations qui traverse le coeur dans sa partie centrale (cellule centrale du réseau dans laquelle la surgaine en aluminium a été retirée. Cf. figure 10). La canne d'oscillations (cf. figure 11) est en aluminium, de diamètre Ø 10 x 11 mm.
Elle est rendue étanche par un bouchon soudé à son extrémité inférieure et par un bouchon amovible à joint de caoutchouc à son extrémité supérieure.

Le chargement de la canne d'oscillations se décompose en trois parties :

- Une partie haute, ou train supérieur,
- L'échantillon d'oscillations,
- Une partie basse ou train inférieur.

Les éléments combustibles constituant les trains inférieur et supérieur sont placés dans des étuis en AG5 de diamètre 7.8 x 9.5 mm et de hauteur variable suivant la taille de l'échantillon d'oscillations. Le combustible des 2 trains est enrichi à 3.5 % en ^{235}U. C'est le même combustible que celui des crayons MELODIE du réseau expérimental.

Les échantillons d'oscillations ont une longueur de 45.5 mm pour un diamètre extérieur de 9.56 mm, excepté pour les échantillons de la série F permettant l'étude des "effets de bout" (voir plus loin). Ces derniers ont une longueur de 161.5 mm pour un diamètre de 9.56 mm également.

En général, lors des mesures par oscillations, on utilise un pilote automatique de précision pour mesurer les variations de réactivité. Il s'agit d'une barre de pilotage asservie au signal d'une chambre à fission placée en périphérie du réacteur.

Le dispositif n'a pas pu être utilisé dans notre cas car l'effet en réactivité des échantillons oscillés (fortement absorbants) dépassait les possibilités compensatrices du pilote (environ 50 pcm).

On procède alors sans celui-ci avec uniquement l'oscillateur et le système d'acquisition. On enregistre directement les variations de flux induites lors des oscillations, par l'intermédiaire d'une chambre placée en périphérie du réacteur.

La puissance moyenne du réacteur est stabilisée auparavant à une valeur constante pour l'ensemble des mesures, en jouant sur les barres de contrôle du réacteur.

Le signal enregistré et traité par le calculateur est proportionnel à l'effet en réactivité de l'échantillon oscillé.

On donne à la figure 12 un signal obtenu lors des oscillations.

La précision des mesures est cependant légèrement moins bonne qu'en utilisant le pilote automatique (environ 0.01 pcm pour 1 heure d'oscillations).

Deux configurations (extrêmement voisines) ont été réalisés : une pour les séries d'échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3, l'autre pour les séries d'échantillons UO_2 - Gd_2O_3.

Configuration R1 utilisée pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 : (figure 6a).

Au centre des 741 cellules du massif UO_2 se trouve la cellule comprenant la canne d'oscillations. La mesure du signal global est faite comme nous l'avons décrite plus haut.

Configuration R2 utilisée pour les échantillons UO_2-Gd_2O_3 (figure 6b)

Par rapport à la configuration R1, on a remplacé les huit cellules entourant la cellule centrale par huit cellules (chambres à fission) avec du combustible UO_2 3 % ce qui ne provoque aucune modification sensible du spectre neutronique dans la cellule centrale du massif expérimental.

d) Résultats expérimentaux

Les mesures brutes obtenues pour les effets en réactivité tout au long de la campagne d'oscillations sont rassemblées dans les tableaux 8 à 10. L'erreur sur les mesures tient compte d'une part, de l'erreur statistique sur chacune de ces mesures et d'autre part, de l'erreur de reproductivité des mesures. Ainsi, pour chaque échantillon i, on définit une précision :

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{\sigma_S}{\sqrt{NC_i}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{\sqrt{NM_i}}\right)^2}$$

où les notations signifient :

$\overline{\sigma_s}$: écart statistique moyenné sur la campagne d'oscillations.
$\overline{\sigma_r}$: écart de reproductivité moyenné sur la campagne d'oscillations.
NC_i : Nombre total de cycles faits sur l'échantillon i.
NM_i : Nombre total des mesures effectuées sur l'échantillon i.

Les échantillons ont été oscillés au moins deux fois, d'où NMi $\geqslant 2$ pour tout échantillon i.

Des incidents techniques ne nous ont pas permis de mesurer le signal local.

III.2.2.2 - Mesures d'efficacité de grappes d'absorbants

a) La techniques de mesures d'efficacité de grappes d'absorbants

Dans le cas des grappes de crayons UO_2 - Gd_2O_3 qui induisent des effets en réactivité très importants de l'ordre de 1000 à 2000 pcm, il est nécessaire d'utiliser une méthode progressive.

- Mesure progressive de l'effet total de la grappe en chargeant ou déchargeant du réacteur les crayons absorbants qui la composent les uns après les autres.

- Modification progressive du chargement de la zone nourricière du réacteur, la réserve maximale de réactivité tolérée pour MINERVE étant de 400 pcm, toutes les barres de contrôle étant en position haute.

On procède donc en déchargeant la grappe crayon par crayon, la zone nourricière étant modifiée chaque fois que l'on atteint la limite de réactivité.

L'effet en réactivité de chaque crayon UO_2-Gd_2O_3 est mesuré par divergence suivant le principe suivant :

Pour une configuration contenant un nombre de crayons UO_2-Gd_2O_3 donné, on détermine la cote de stabilisation (ou cote critique) de l'une des barres de contrôle du réacteur, les trois autres étant en position haute.

On décharge alors un crayon UO_2-Gd_2O_3, ce qui entraîne une augmentation de la réactivité. La nouvelle configuration est donc surcritique à la cote de stabilisation définie précédemment et le temps de doublement mesuré à cette cote donne par l'intermédiaire de l'équation de Nordheim l'effet en réactivité du crayon UO_2-Gd_2O_3 déchargé.

Cette mesure étant faite, on détermine alors la nouvelle cote de stabilisation qui deviendra la cote de divergence après déchargement d'un nouveau crayon et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on atteigne l'excès en réactivité limite toléré pour le réacteur.

On diminue alors le chargement de la zone thermique et le procédé est renouvelé pour les crayons UO_2-Gd_2O_3 suivants.

La mesure des temps de doublement est réalisée à partir des indications d'un voltmètre numérique relié linéairement à la puissance du réacteur.

Pour chaque configuration une dizaine de mesures du temps de doublement ont été effectuées, la précision sur la valeur moyenne est de l'ordre de 1 à 2 % pour les temps de doublement compris entre 7 et 60 secondes. Pour les temps de doublement plus courts et pour ceux de plusieurs minutes, la précision est comprise entre 5 et 10 %.

L'équation de Nordheim, utilisée pour le passage du temps de doublement à la réactivité est résolue avec les valeurs suivantes pour le βeff, le temps de vie des neutrons prompts et la répartition des neutrons retardés /19/.

		Configurations UO_2	
β eff		716 ± 15 pcm	
1		93 µs	
		λi (sec^{-1})	$\frac{\beta i}{\beta eff}$ (%)
GROUPE DE NEUTRONS RETARDES	1	0.0124	3.3
	2	0.0305	21.9
	3	0.111	19.6
	4	0.301	39.5
	5	1.140	11.5
	6	3.010	4.2

La modification du chargement de la zone nourricière en cours de mesure de la grappe nécessite d'effectuer une équivalence entre l'antiréactivité des crayons dans la zone centrale et le poids en réactivité des éléments combustibles de la zone nourricière.

Cette équivalence est très délicate à calculer. Aussi afin de tester les calculs, a-t-on procédé aux mesures complémentaires suivantes :

- Mesure de la réactivité de certaines configurations avec différents chargements de la zone nourricière,

- Mesure de la réactivité d'une configuration avec 9 trous d'eau.

- Mesure de la réactivité d'un crayon pyrex.

b) Caractéristiques des grappes UO_2 - Gd_2O_3

Trois grappes de 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant ont été étudiées :

Diamètre des pastilles	8,0 mm	8,2 mm	8,2 mm
Nature du gadolinium	cobroyé	cobroyé	grains 380 µm
Teneur en gadolinium (mg/cm3)	200 mg/cm3	300 mg/cm3	300 mg/cm3
Enrichissement en ^{235}U	3 %	5,1 %	5,1 %

Le gainage des crayons des grappes est en zircaloy, de diamètre 8,4 x 9,6 mm. La hauteur du combustible est identique à celui des aiguilles UO_2 à 3,5 % du réseau MELODIE IV, soit 600 mm.

Nous donnons à la figure 13a un schéma de la disposition d'une grappe de 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 au centre du réseau MELODIE.

c) Résultats expérimentaux

La figure 13b donne l'ordre de déchargement des crayons UO_2 - Gd_2O_3. Le crayon n°1 est enlevé en premier et on termine par le crayon n°9. On remarquera que les déchargements se font symétriquement par rapport au centre de la grappe.

Quand un crayon est déchargé, il est donc remplacé par un trou d'eau à la configuration suivante.

Lors de ces mesures les barres de contrôle n° 1, 2 et 4 du réacteur sont toujours en position haute. Seule la côte de la barre n°3 est modifiée entre les différentes configurations.

Les résultats obtenus pour l'effet en réactivité des trois grappes sont présentés dans le tableau 11. On donne aussi les différents chargements de la zone nourricière sur les figures 14 à 17.

Le tableau suivant montre les efficacités totales des 3 grappes d'après l'expérience :

GRAPPE	EFFICACITE TOTALE en pcm
UO_2 (3,0 %) - Gd_2O_3 cobroyé (200 mg/cm3)	- 1650 ± 50
UO_2 (5,1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300 mg/cm3)	- 1640 ± 40
UO_2 (5,1 %) - Gd_2O_3 grains 380 µm (300 mg/cm3)	- 1280 ± 40

IV. SCHEMA DE CALCUL DU GADOLINIUM

IV.1 - Position du problème

L'interprétation des mesures par oscillations et des mesures d'efficacité de grappes d'absorbants nécessite le traitement d'une ou plusieurs hétérogénéités dans un réseau UO_2. On se heurte alors à des difficultés au niveau du calcul de la cellule gadoliniée et du couplage entre cette cellule et celles du réseau environnant. Les difficultés sont les suivantes :

- le calcul de la structure fine du flux à l'intérieur de la cellule gadoliniée,

- le calcul de la double hétérogénéité apparaissant lorsque le gadolinium se présente sous forme de grains,

- le couplage entre les différentes cellules du réseau et la cellule gadoliniée.

Nous allons aborder successivement ces trois points.

IV.2 - Calcul de la structure fine du flux à l'intérieur d'une hétérogénéité absorbante

Dans le cas d'un absorbant fortement autoprotégé, le gradient du flux est fort à la surface du crayon et faible au centre. En conséquence, pour prendre correctement en compte la structure fine du flux, on doit découper le crayon absorbant en plusieurs couronnes concentriques. Le but de cette étude est de tester l'effet de la discrétisation spatiale sur le calcul de la structure fine du flux.

Plusieurs calculs, correspondants à 1, 3, 5 ou 7 couronnes concentriques dans un crayon UO_2 - Gd_2O_3 ont été réalisés. Nous n'avons considéré que le cas de couronnes équivolumiques car M. NASR a montré dans la référence /20/ que la stratégie consistant à prendre des couronnes d'épaisseurs égales ne donnait pas de résultats satisfaisants.

L'étude a porté sur un motif multicellules de taille 11 x 11 (cf. figure 18), représentant un crayon UO_2 - Gd_2O_3 chargé à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3 dans un réseau UO_2 enrichi à 3.5 % en ^{235}U.

Tous les calculs ont été effectués avec le module EURYDICE dans son option (ROTH, WIGNER) sur les différentes discrétisations du crayon présentées ci-dessous :

Nombre de couronnes dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3	RAYONS EXTERIEURS DES DIFFERENTES COURONNES (EN CM)						
1	0.40250						
3	0.23238		0.32864		0.40250		
5	0.18000	0.25456		0.31178		0.36001	0.40250
7	0.15213	0.21514	0.26350	0.30426	0.34017	0.37264	0.40250

Le tableau 12 synthétise les résultats sur les paramètres intégraux. Les différents calculs donnent des résultats extrêmement voisins : entre les calculs à 1 zone et 7 zones, l'écart est maximal et ne représente que quelques pour-mille sur l'absorption du gadolinium. Les distributions spatiales du flux thermique dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3 sont données sur la figure 19. Cette figure montre que la prise en compte du gradient de flux entre la surface du crayon et son centre semble nécessiter un nombre de couronnes assez élevé.

Les variations des sections microscopiques des isotopes impairs du gadolinium à l'intérieur du crayon poison sont présentées sur les figures 20 et 21.

Cette étude montre que le calcul du flux et du spectre requiert un nombre important de couronnes équivolumiques dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3. Cependant, le calcul de l'efficacité du crayon gadolinié ne nécessite qu'un nombre restreint de couronnes.

En conclusion, nous pouvons donc dire que c'est la nature de l'étude que l'on veut faire qui est déterminante pour le choix du découpage spatial du crayon absorbant :

- si l'on ne s'intéresse qu'aux paramètres globaux, un nombre limité de couronnes est suffisant (de l'ordre de 2 ou 3),

- si l'on traite un cas en évolution, un nombre élevé de couronnes est nécessaire, de manière à bien prendre en compte les variations du flux et du spectre dans le crayon absorbant.

IV.3 - Traitement d'un poison sous forme de grains

Lorsque le gadolinium se présente sous forme de grains et que le diamètre de ceux-ci est grand devant le libre parcours moyen des neutrons thermiques dans le poison, il faut tenir compte de ce phénomène de double hetérogénéité.

La première hétérogénéité dite microscopique est due au creusement de flux à l'intérieur des grains. La distribution de flux sur l'ensemble du crayon comportant les grains de poison constitue la seconde hétérogénéité dite macroscopique.

Auparavant, les codes de calcul de transport permettaient de traiter seulement l'hétérogénéité macroscopique (Cf. IV.2), à condition d'adopter un découpage spatial suffisamment fin. On ne disposait d'aucun traitement direct de la double hétérogénéité.

Dernièrement, il a été introduit dans APOLLO le module "BIHET" traitant ce problème dans l'hypothèse de l'isotropie des chocs. En outre, on peut mettre en présence dans le même diluant différents types de grains. Dans les méthodes employées auparavant, il fallait définir et utiliser des sections efficaces effectives σ_p représentatives de la structure en grains. On calculait un facteur d'autoprotection f tel que : $\sigma_p = \sigma_o f$ où σ_o est la section microscopique du poison non autoprotégée. Dans cette partie, on compare trois méthodes de calcul du

facteur f ; l'une utilise un calcul de transport APOLLO en géométrie sphérique, la seconde est basée sur une formulation analytique approchée, la troisième est réalisée à l'aide du module "BIHET" intégré dans le code de transport APOLLO.

Nous appliquons ces trois méthodes au cas d'un milieu Al_2O_3 - Gd_2O_3 comportant des grains d'oxyde de gadolinium de rayon 198 µm ou 376 µm (correspondant aux échantillons de la série B).

a) Méthode KERA

Nous allons d'abord rappeler cette méthode qui a été proposée par J. MONDOT dans le référence /21/.

On considère un milieu infini composé de cellules sphériques de rayon R_2 avec condition de réflexion à la surface. A l'intérieur de ce milieu correspondant au diluant, on représente le grain de poison par une sphère concentrique de rayon R_1.

R_1 est le rayon moyen des grains ($R_1 < R_2$). Les densités du poison, du diluant et la charge en poison permettent de déterminer R_1 et R_2. Sur cette géométrie on effectue un calcul APOLLO qui permet de déterminer le rapport des flux $\frac{\text{Ø poison}}{\text{Ø diluant}}$ dans chacun des 99 groupes d'énergie utilisés.

Le module "KERA" d'Apollo permet d'obtenir les sections effectives condensées d'un isotope qui tiennent compte de la forme spatiale du flux dans une macrozone donnée.

La section efficace condensée pour un isotope i dans un groupe g et tenant compte d'une forme spatiale du flux dans une macrozone Z est calculée comme suit :

$$\sigma_K{}^i\ (g,Z) = \frac{1}{\bar{N}_i} \quad \frac{\int_g \int_Z \sigma_i(u)\ N_i(\vec{r})\ \varphi(\vec{r},u)\ du\ d\vec{r}}{\int_g \int_Z\ \varphi(\vec{r},u)\ du\ d\vec{r}}$$

$$\text{avec } \overline{N_i} = \frac{\int_Z N_i(\vec{r})\, dr}{\int_Z dr}$$

Dans chaque groupe g le facteur d'autoprotection est défini par :

$$f^g = \frac{\sigma_K^{\,g}}{\sigma_o^{\,g}}$$

L'application de cette méthode soulève quelques difficultés :

α) Le rapport des flux $\frac{\text{Ø poison}}{\text{Ødiluant}}$ dépend du rapport des sources de ralentissement dans les deux milieux donc du spectre présent (dans le cas Al_2O_3 - Gd_2O_3, il s'agit essentiellement du ralentissement dû à la diffusion sur l'oxygène).

Le spectre présent dans le calcul proposé est loin de celui qui règne réellement dans le milieu empoisonné. Des tests effectués dans /21/ montrent que cet effet de spectre induit des écarts maximum de l'ordre de 1 % sur le rapport des flux $\frac{\text{Ø poison}}{\text{Ødiluant}}$.

β) Le découpage spatial du grain doit être assez fin pour que la précision du calcul soit correcte. En effet, comme le flux est considéré uniforme dans les zones de calcul, l'épaisseur des zones doit être de l'ordre du libre parcours moyen d'absorption des neutrons.

b) Expression analytique de f

On rappelle d'abord la méthode de calcul élaborée par W.B DOUB /22/.

La probabilité de transmission des neutrons dans un milieu homogène sur un parcours de longueur ℓ est donnée par $T(\Sigma,\ell) = e^{-\Sigma\ell}$ où Σ est la section efficace macroscopique du milieu.

Considérons maintenant des sphères de poison purement absorbantes du rayon r réparties dans une matrice homogène.

On démontre que la probabilité de transmission des neutrons sur un parcours de longueur ℓ est donnée par :
$T(\Sigma_1, \Sigma_2, \ell) = e^{-\ell\Sigma_2}\, T(\Sigma_1 - \Sigma_2, 0, \ell)$.

où Σ_1 est la section efficace macroscopique du poison et Σ_2 est la section efficace macroscopique de la matrice. Si l'on pose $\Sigma = \Sigma_1 - \Sigma_2$, on voit qu'on se ramène à la recherche de la transmission des neutrons à travers une matrice non absorbante contenant des grains de section macroscopique d'absorption Σ. DOUB a utilisé la méthode statistique suivante : supposons que lorsqu'un neutron rencontre un grain il a la probabilité $\bar{t}$ de traverser ce grain. On peut donc écrire :

$$T = \sum_{x=o}^{m} P_{(x)}\, \bar{(t)}$$

où

x = nombre de grains dont le centre se situe dans l'élément de volume associé à la trajectoire du neutron.

P(x) = probabilité pour que cet élément de volume contienne le centre de x grains.

m = nombre maximum de particules de poison dans l'élément de volume.

Pour le calcul de P(x), DOUB a choisi une distribution binomiale de Bernoulli :

$$P(x) = \frac{m\,!}{x\,!\,(m-x)!}\; V_1^{\,x}\; (1 - V_1)^{m-x}$$

V_1 est la proportion de cellules de la matrice occupée par une cellule de poison.

Le nombre de cellules dans la plaque est égal au nombre maximum de sphères de poison qui peuvent être empilées, soit $V_1 = \frac{V}{g}$

où V = fraction de volume occupé par les grains,

g = fraction de volume occupé par l'ensemble des sphères empilées. Pour des sphères parfaitement empilées, la valeur théorique de g est 0,74 (/23/).

Doub aboutit à l'expression suivante de f :

$$f = \frac{1}{\frac{2}{3}\ y\ \frac{V}{g}} \log \left[\frac{1}{1 - \frac{V}{g}(1 - \bar{t})}\right] \text{ avec } y = 2r\ (\Sigma_1 - \Sigma_2)$$

Dans la référence /24/, on donne l'expression de $\bar{t}$ en fonction de la probabilité P_o, qu'a un neutron né uniformément et isotropiquement dans la sphère de poison d'en sortir sans choc :

$$\bar{t} = 1 - \frac{2}{3}\ y\ P_o$$

avec $$P_o = \frac{2}{y^3}\left(\frac{y^2}{2} - 1 + (1 + y)\ e^{-y}\right)$$

Pour calculer f, il suffit de connaître les deux paramètres y et V.

c) Calcul de f avec le module BIHET du code APOLLO

Le module BIHET du code APOLLO permet de traiter les problèmes d'hétérogénéités multiples en utilisant le principe de base suivant : on cherche toutes les probabilités de collision du problème à plusieurs niveaux d'hétérogénéité en combinant entre elles des probabilités de collision élémentaires. L'hétérogénéité globale (géométrie des milieux contenant les grains) peut être quelconque. De plus, chaque milieu peut contenir plusieurs types différents de grains.

C1) Rappel de la théorie des probabilités de collision pour un milieu à grains

On utilisera les mêmes notations que dans la référence /25/. Considérons une géométrie à deux niveaux d'hétérogénéité. Au niveau de la géométrie globale, les sous-volumes seront désignés par les indices i et ℓ et peuvent contenir différents types de grains sphériques d'indices j et m. Chaque grain est divisé en couches sphériques d'indices k et n.

Le but de la méthode est de calculer les probabilités de collision suivantes :

P_{ijk}^{lmn} = probabilité pour un neutron né de façon uniforme et isotope dans la sous-couche k d'un grain de type j du sous-volume i, d'avoir son premier choc dans la sous-couche n d'un grain de type m du sous-volume ℓ.

L'équation exacte du transport des neutrons dans un milieu contenant des grains est simplifiée en formulant deux hypothèses :

1 - La distribution angulaire et spatiale des neutrons entrant dans les grains est uniforme.

2 - Soit un grain entouré de diluant. La probabilité pour un neutron sortant de ce grain uniformément et isotropiquement pour la première fois de subir une collision, est égale à la probabilité pour un neutron né de façon uniforme et isotrope dans le diluant de subir la même collision.
D'autre part, on adopte l'hypothèse fondamentale des méthodes à double niveau d'hétérogénéité, à savoir :

3 - Chaque sous-volume de la géométrie de niveau global peut être caractérisé par une section efficace macroscopique autoprotégée $\tilde{\Sigma}_i$ qui préserve la probabilité de transmission $(1 - \tilde{P}_s^i)$ de ce sous-volume.

C2) Calcul du facteur d'autoprotection dans les grains

L'effet de l'autoprotection des grains, causé par la chute du flux, est pris en compte par un facteur d'autoprotection F(i,j) que l'on multiplie aux propriétés nucléaires des grains de type j dans le sous-volume i. On montre que :

$$\tilde{\Sigma}_i = (1 - f(i))\,\Sigma_i + \sum_j f(i,j) \sum_k \frac{W_{K(j)}}{W(j)}\,\Sigma_K(i,j) :$$

avec les notations suivantes :

f(i,j) = fraction volumique des grains de type j dans le sous-volume i.

$$f_i = \sum_j f(i,j)$$

$W_K(j)$ = volume de la sous-couche K des grains de type j

$$W(j) = \sum_K W_K(j)$$

$\Sigma_K(i,j)$ = section efficace macroscopique de la sous-couche K des grains de type j dans le sous-volume i

$$\Sigma_i = \sum_j \sum_k \Sigma_k(i,j)$$

La méthode employée pour calculer les facteurs d'autoprotection consiste à conserver les probabilités de transmission sans choc des neutrons. Cette méthode est donc similaire à la méthode "analytique". Par contre, elle est différente à ce niveau de la méthode "KERA" qui utilise le spectre de pondération obtenu lors de précédents calculs de flux au niveau de chaque type de grain.

On obtient la formule suivante pour les facteurs d'autoprotection :

$$F(i,j) = \frac{\overset{j}{Q_\gamma}(\text{grain})\quad \Sigma_i}{\overset{j}{Q_\gamma}(\text{diluant}) \sum_K \frac{W_{K(j)}}{W(j)}\quad \Sigma_K(i,j)}$$

où Q_s^j est la probabilité pour un neutron entrant dans un grain de type j (situé dans le sous-volume i) par sa surface extérieure, de subir son premier choc dans ce grain.

Dans notre cas, le diluant (Al_2O_3) ne comporte qu'un seul type de grains (Gd_2O_3) ; on obtient alors le facteur d'autoprotection suivant :

$$F(i) = \frac{Q_j^{\delta}\,(\text{grain})}{Q_j^{\delta}(\text{diluant})}$$

Toutes les probabilités Q_j^{δ} se calculent par le sous-programme ALCOLL /26/.

d) Comparaison des trois méthodes

On a calculé le facteur d'autoprotection f pour des charges d'oxyde de gadolinium de 2 % et 4 % et des diamètres moyens de grains de 198 µm et 376 µm.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux 13 à 15 avec les notations suivantes :

FK = Facteur d'autoprotection calculé avec la méthode "KERA".

FB = Facteur d'autoprotection calculé avec le module BIHET.

FA = Facteur d'autoprotection calculé avec la méthode analytique.

On donne aussi les écarts des méthodes "BIHET" et "analytique" par rapport à la méthode "KERA".

Remarque : Les tableaux 13, 14 et 15 ne montrent que les facteurs d'autoprotection microscopiques pour les 47 groupes thermiques du découpage APOLLO à 99 groupes. En effet, dans la partie rapide, le parcours optique des neutrons dans le grain devient très grand et l'autoprotection des grains est négligeable.

Les résultats obtenus montrent la cohérence des 3 méthodes. On remarque que les méthodes "BIHET" et "analytique" donnent des valeurs extrêmement voisines pour le facteur d'autoprotection.

Les écarts les plus importants (de l'ordre de 4 %) se situent aux basses énergies du spectre thermique et ceci pour les deux tailles de grains. Ils s'expliquent par la raison suivante :

- l'expression analytique de f est établie en supposant la matrice entourant les grains non diffusante. Cette hypothèse n'est pas du tout vérifiée pour l'Al_2O_3 et conduit à surestimer l'autoprotection : en effet, du groupe 75 au groupe 99 on voit que : FK > FB et FK > FA.

e) Conclusion

La comparaison des trois méthodes de calcul d'un absorbant sous forme de grains montre que celles-ci sont cohérentes. On a montré que la méthode "analytique" et la méthode "BIHET" donnent des résultats très proches.

Pour les calculs d'interprétation concernant du gadolinium sous forme de grains, nous emploierons la méthode "BIHET" car elle est plus facile à mettre en oeuvre que les deux autres méthodes et permet de faire des calculs d'évolution en un seul passage.

IV.4 - Etude du couplage entre les différentes cellules d'un réseau comportant une ou plusieurs hétérogénéités absorbantes

L'interprétation des mesures par oscillations et des mesures d'efficacité de grappes de crayons UO_2 - Gd_2O_3 /13/ décrites au paragraphe III pose le problème du traitement d'une ou plusieurs hétérogénéités absorbantes dans un réseau UO_2.

Différentes approximations correspondant à différents modules ou options sont possibles dans le code APOLLO, tant au niveau du calcul de probabilités de collision pour chaque cellule, que pour le calcul du couplage entre les différentes cellules, pour calculer les effets dus à des absorbants.

Ces approximations peuvent conduire à des écarts importants.

Il est d'autant plus nécessaire de pouvoir comparer les différents modules (ROTH, EURYDICE, NAUSICAA, MARSYAS) que, compte tenu des limites des codes et des coûts de calcul, les calculs les plus précis ne sont pas utilisables pour les études courantes.

Dans une première partie, nous donnons la stratégie adoptée pour cette étude et on rappelle les différentes approximations multicellules du code APOLLO.

La deuxième partie traite le cas des configurations avec un seul crayon, à savoir les cas :

a) UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3)
b) UO_2 (5,1 %) - Gd_2O_3 (300 mg/cm3)

Les mesures par oscillations donnent une illustration de ce cas. Les résultats acquis lors de cette étude sont d'ailleurs appliqués lors de leur interprétation.

Dans la troisième partie, on étudie la configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3, représentative de la grappe expérimentale pour les types d'absorbants a) et b). Les constantes neutroniques déduites de cette étude seront utilisables pour les calculs de MINERVE afin de prendre en compte les variations de poids de la zone de mesure et du coeur nourricier en fonction de l'antiréactivité des crayons des grappes (/5/ et /27/) et pour interpréter les résultats.

En conclusion, nous donnons l'option de calcul que nous avons choisi d'utiliser, c'est-à-dire le schéma conciliant une bonne précision et un coût de calcul acceptable.

IV.4.1 - Philosophie de l'étude et détermination d'un maillage en énergie minimal

IV.4.1.1 - Philosophie de l'étude

Pour juger des performances associées à chaque hypothèse physique des modules multicellules, il est nécessaire de réaliser une étude paramétrique : les résultats donnés par chaque option de chacun des modules multicellules doivent être comparés, ce qui permet de quantifier l'erreur introduite par l'utilisation de chaque hypothèse physique.

On prend comme référence un calcul le plus précis possible et on introduit successivement des approximations de plus en plus grossières.

Cette stratégie impose de mener l'étude sur un jeu unique de sections efficaces qui devra être représentatif des hétérogénéités réelles étudiées. Vu le surcoût important des calculs à 99 groupes, nous avons donc été conduits à déterminer un découpage énergétique comportant un nombre restreint de groupes mais traitant correctement les variations de spectre dans les configurations étudiées. La bibliothèque de sections efficaces condensées sur ce maillage est ensuite utilisée dans tous les calculs.

IV.4.1.2 - Etude de la condensation en énergie

Le calcul de référence est celui qui correspond au maillage standard à 99 groupes dont 52 rapides.

Les différentes condensations déjà utilisées sont les suivantes :

- Le maillage à 34 groupes recommandé pour les cas contenant du gadolinium /20/.

Les limites supérieures des groupes de ce maillage sont les suivantes :

3 groupes rapides	: 4 8 12
11 groupes épithermiques	: 16 20 24 25 28 32 36 40 44 48 52
20 groupes thermiques	: 54 57 62 66 67 68 69 70 72 75 76
	78 80 83 85 88 90 93 97 99

Ce découpage est issu du découpage à 29 groupes /28/ qui tient compte des résonances de l'uranium et du plutonium auquel on a ajouté :

- deux groupes supplémentaires (groupes 25 et 75) de manière à obtenir des sorties condensées sur les quatre macrogroupes habituels /16/.

- trois groupes thermiques (groupes 54, 80 et 90) afin de séparer deux résonances du ^{155}Gd (groupe 54) et de tenir compte de la variation rapide des sections efficaces du gadolinium avec l'énergie (groupes 80 et 90).

- Le maillage à 5 groupes

Ce maillage est peu différent du maillage à 4 groupes habituel utilisé en diffusion. La présence d'un groupe supplémentaire dans ce maillage est due au fait qu'il est nécessaire de respecter la coupure thermique d'APOLLO (2.77 eV) dans la procédure KERA.

Les limites supérieures des groupes sont les suivantes :

. 1 groupe rapide : 12 (E_{mini} = 0.9 MeV).
. 2 groupes épithermiques : 25 52 (E_{mini} = 5 keV ; 2.77 eV).
. 2 groupes thermiques : 75 99 (E_{mini} = 0.625 ev ; 0 eV).

Il a déjà été montré /29/ que pour le type d'étude qui nous intéresse, le maillage à 34 groupes est surabondant : pour un objectif de précision de l'ordre de 1 %, les études de discrétisation déjà réalisées ont montré que des maillages de l'ordre de 8 à 10 groupes s'avèrent satisfaisants. En conséquence, nous avons pris comme point de départ le découpage à 5 groupes décrit précédemment.

Le profil très pentu (résonances à 0,027 et 0,031 eV) des sections efficaces des deux isotopes ^{155}Gd et ^{157}Gd (figure 2) conduit à penser que le découpage à 5 groupes est très insuffisant dans le domaine thermique car il ne comporte qu'un seul groupe pour décrire la "maxwellienne" ; nous avons donc ajouté deux groupes supplémentaires dont les limites sont aux groupes 80 et 90. Cette modification s'impose aussi par le fait que l'absorption du gadolinium s'effectue à 90 % dans le domaine thermique (cas d'un crayon UO_2 gadolinié chargé à 3 % en Gd_2O_3).

Les limites supérieures des groupes du découpage adopté pour notre étude sont donc :

Nº groupe	12	25	52	75	80	90	99
Léthargie limite	2.4	7.6	15.1	16.58809	17.16222	18.68204	25.23312
Energie limite	0.907 MeV	5 keV	2.768 eV	0.625 eV	0.352 eV	0.077 eV	0.11 meV

L'étude de la condensation en énergie a porté sur un motif multicellules représentant un crayon UO_2-Gd_2O_3 dans un réseau UO_2. Ce motif est décrit en détail dans le paragraphe IV.4.1.3

Nous présentons dans les tableaux 16, 17 et 18 la comparaison entre les résultats obtenus avec les bibliothèques condensées à 5 et à 7 groupes et le calcul de référence à 99 groupes. Les résultats par cellule sont présentés sur le maillage classique à quatre macrogroupes qu'on rappelle dans le tableau ci-dessous :

nº du macrogroupe	1	2	3	4
Léthargie limite	2.4	7.6	16.58809	25.23312
Energie limite	0.907 MeV	5 keV	0.625 eV	0.11 meV

Le tableau 17 montre l'insuffisance du découpage à 5 groupes : on obtient des écarts importants dans le domaine thermique (- 3 % sur le flux thermique) et également sur les taux de réaction (- 7 % sur le taux d'absorption). Par contre, le maillage à 7 groupes est satisfaisant : en effet, son utilisation conduit à des erreurs négligeables aussi bien sur le spectre que sur les distributions de puissance (quelques pour mille). La discrétisation énergétique dans le domaine thermique s'avère suffisante puisque l'écart obtenu sur le taux d'absorption de la cellule gadoliniée est de 0.6 %, erreur inférieure au critère de 1 % que nous nous imposons.

Tenant compte de ce critère, le nombre de groupes et le choix de ceux-ci semblent optimum ; en effet, nous avons vérifié que la suppression d'un groupe détériore nettement les résultats. A titre d'exemple, le tableau 19 montre la comparaison entre les résultats d'un calcul à 6 groupes (découpage à 7 groupes auquel on a supprimé le groupe 80) et ceux du calcul de référence.

IV.4.2 - Rappel des différentes options de calcul du code APOLLO

Le code de calcul APOLLO résout l'équation de transport sous sa forme intégrale par la méthode des probabilités de collision dans l'approximation multigroupe en géométrie cylindrique, sphérique ou plane.

Les probabilités de première collision P_{ij}, (probabilité pour un neutron né de manière uniforme et isotope dans le milieu i de subir son premier choc dans le milieu j) sont fournies par le sous-programme ALCOLL dans l'option cylindrique (le combustible est sous forme de crayons).

Lorsque l'on a à traiter plusieurs cellules en interaction, APOLLO permet le calcul de ce cas en approximation multicellules : on calcule alors la probabilité de première collision P_{iIjJ} pour un neutron né dans le milieu i de la cellule I de subir son premier choc dans le milieu j de la cellule J. Les P_{iIjJ} sont engendrées par les Pij définies pour chaque cellule. APOLLO présente différentes approximations aussi bien pour le calcul des P_{ij} que pour obtenir les P_{iIjJ}.

Les principales hypothèses multicellules des modules d'APOLLO sont les suivantes :

Module MULTICELLULE classique de ROTH /30/

Les cellules sont cylindrisées ; les neutrons entrent de façon isotrope dans les cellules. Pour un neutron sortant d'une cellule, la probabilité de sortie par tout élément de la surface latérale de cette cellule est la même.

EURYDICE /30/

Option ROTH : Il est équivalent au module multicellules ROTH classique.

Option ROTHx4 : C'est l'hypothèse ROTH mais pour chaque cellule, on considère quatre courants entrants, un par face.

Option DP-0 : C'est l'hypothèse ROTHx4 sans l'hypothèse de cylindrisation. La réflexion est isotrope.

Option DP-1 : On utilise trois composantes des courants intercellules correspondant à un développement DP-1 du flux de surface. Cette hypothèse implique 12 courants entrants par cellule. La réflexion est spéculaire.

Module NAUSICAA /31/

Option P1 : La géométrie est à deux dimensions. La cellule est découpée en couronnes et chaque couronne peut être découpée en secteurs azimutaux. Le flux intégral et les probabilités de collision sont calculés en utilisant la forme géométrique réelle de la cellule. Le flux angulaire à la surface des cellules est linéairement anisotrope et uniforme sur chaque côté.

Option P0 : Par rapport au cas précédent, on ajoute l'hypothèse d'isotropie du flux angulaire à la surface des cellules.

Module MARSYAS /32/

C'est un vrai calcul à deux dimensions avec probabilités de collision exactes. Ce module permet la représentation d'un système par un ensemble de cercles et de lignes droites. Ce sera notre calcul de référence pour la configuration avec 1 crayon UO_2-Gd_2O_3.

IV.4.3 - Etude de la configuration avec un crayon UO_2 - Gd_2O_3

L'étude du cas avec un crayon UO_2 - Gd_2O_3 permet, d'une part de découpler l'effet de structure fine dû à un crayon absorbant de l'effet d'ombre qui s'ajoute dans le cas d'une grappe, et d'autre part cette étude est représentative de la configuration expérimentale rencontrée lors des mesures par oscillations.

Ce cas a été traité dans la géométrie réelle (crayons, gaines, modérateur sont représentés distinctement) afin d'éviter les erreurs liées à l'homogénéisation des cellules. Les figures 7a et 7b représentent respectivement une cellule UO_2 du massif MELODIE IV et une cellule UO_2-Gd_2O_3.

Le motif mutlicellules 9 x 9 adopté pour le calcul de cette configuration est donné en figure 22. En effet, sur cette géométrie limitée, nous pouvons faire un calcul MARSYAS à un coût non prohibitif et des calculs "NAUSICAA" et "EURYDICE" sans employer l'option "Mélange"*

---

* L'option "Mélange" permet de réduire le nombre de cellules à traiter. On constitue alors les cellules dites "physiques" qui remplacent ainsi un ensemble de cellules engendrées par une même cellule génératrice.

des cellules. Grâce à cette stratégie, nous pouvons faire un développement à 3 composantes du flux angulaire à la surface de chaque cellule (pour NAUSICAA : Option P1 ; pour EURYDICE : Option DP-1).

Les calculs ont été effectués avec le découpage à 7 groupes décrit au paragraphe IV 4.1.2, à laplacien critique imposé.

La condensation à 7 groupes a été réalisée avec l'option KERA sur le multicellules ROTH à 99 groupes qui calcule une fois pour toutes le laplacien critique de la configuration.

Les isotopes du gadolinium utilisés correspondent au jeu de sections efficaces actuellement recommandé /16/.

Plusieurs études comparatives des modules d'APOLLO (/33/, /34/) nous ont permis de choisir le découpage géométrique des cellules (points de calcul).

Ce découpage est donné pour chacun des cas, dans la figure 23.

Pour les différents cas traités, nous pouvons faire les commentaires suivants :

- Le crayon UO_2 - Gd_2O_3 n'est découpé qu'en 3 zones équivolumiques. En effet, ce nombre de zones est suffisant car nous ne nous intéressons qu'aux paramètres intégraux des cellules (/20/, Cf. Paragraphe IV.2).

- Pour le calcul MARSYAS à 68 points, il faut noter la sensibilité de la convergence du calcul avec le pas d'intégration choisi pour la détermination des Pij. L'étude a montré qu'il faut utiliser une distance entre les lignes d'intégration inférieure au millimètre (option du code : DELTR = 0.1) et que la convergence des résultats nécessite un pas au moins deux fois plus petit (DETR = 0.05). Ce résultat avait déjà été constaté pour un calcul avec un crayon absorbant d'A.I.C. /33/.

- Pour rendre la comparaison MARSYAS-NAUSICAA cohérente, la discrétisation du flux intégral doit être identique dans ces deux modules. On a seulement une différence dans le modérateur de la cellule 2. En effet, MARSYAS ne permet pas ce type de découpage.

- L'annexe A montre qu'une discrétisation plus fine du modérateur des cellules 7 à 15 dans le calcul NAUSICAA P1 n'entraîne pas de changement notable sur les résultats.

- En ce qui concerne les calculs EURYDICE et MULTICELLULES ROTH nous n'avons retenu que deux types de cellules dont la discrétisation spatiale est donnée dans la figure 23.

Il faut remarquer que seul ROTH implique une cylindrisation des cellules pour les données géométriques des calculs APOLLO.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux 20 et 21 où nous donnons les valeurs obtenues avec le calcul de référence (MARSYAS) et les écarts en % des calculs NAUSICAA (P1 et P0), EURYDICE (DP-1, DP-0, ROTHx4) et ROTH par rapport à MARSYAS.

Ces tableaux montrent que les écarts sur les flux dans la cellule UO_2-Gd_2O_3 et sur les taux de fission dans les cellules du réseau, par rapport à MARSYAS, sont à peu près identiques pour les deux cas traités ; les erreurs introduites par les approximations multicellules sont donc du même ordre de grandeur dans la gamme de charge en Gd_2O_3 de quelques centaines de mg/cm3.

IV.4.3. a) Calcul de l'efficacité de l'absorbant (tableau 20)

ROTH surestime le creusement du flux lié à l'absorbant. Ceci entraîne une erreur de l'ordre de 3.5 % sur le calcul de l'antiréactivité du poison. Cette erreur est en grande partie résorbée si l'on utilise les modules NAUSICAA (P0 ou P1) ou EURYDICE (ROTHx4 - DP-0 - DP-1).

En effet, l'option ROTHx4 du module EURYDICE permet de prendre en compte le comportement spatial du courant en calculant un courant pour chaque côté de la cellule au lieu d'utiliser un courant uniforme sur toute la surface de la cellule (approximation de ROTH). L'effet de retour du neutron par sa face d'entrée est ainsi supprimé. Le calcul des probabilités P_{ss} se fait différemment entre les options ROTH et ROTHx4 : pour ROTH, on dispose d'un $\overline{P_{ss}}$ (P_{ss} moyen) tandis que l'on a un $P_{S_I S_J}$ par face dans ROTHx4. Notons cependant que le module ROTH est employé ici dans les conditions qui lui sont les plus défavorables. Il a été montré dans la référence /27/ que, pour employer l'approximation de ROTH dans le traitement d'une hétérogénéité absorbante, il faut adopter une stratégie "cellules enrobantes" plutôt qu'une stratégie "faces et angles". Avec cette stratégie, on compense favorablement le modèle grossier de calcul des P_{ss} qu'on trouve dans l'approximation de ROTH.

Par rapport à ROTHx4, l'emploi de l'option DP-0 d'EURYDICE permet de calculer rigoureusement les $P_{S_J S_J}$ et l'effet est de l'ordre de 1.6 % sur l'antiréactivité du poison etsur le rapport des flux moyens thermiques.

L'effet DP-0/DP-1 ne représente que 0.8 % sur l'antiréactivité du poison. Cet effet est dû à la prise en compte dans l'option DP-1 de l'anisotropie du courant sur chaque côté d'une cellule.

L'utilisation du développement DP-1 entraîne un coût en temps de calcul environ 6 fois supérieur au temps de calcul DP-0 et légèrement plus fort que celui de NAUSICAA P1.

L'effet ROTH/DP-1 est fort : 5.1 %. En effet, c'est la somme des 3 effets énumérés précédemment et rappelés ci-dessous :

effet	ROTH/ROTHx 4	:	2.7 %
effet	ROTHx4/DP-0	:	1.6 %
effet	DP-0/DP-1	:	0.8 %

On voit que l'effet ROTH/ROTHx4 représente à lui seul plus de la moitié de l'effet ROTH/DP-1.

Il existe encore une approximation dans les calculs EURYDICE : on ne peut pas traiter dans ce multicellules le gradient de flux induit par l'absorbant dans les cellules voisines. Seul le module multicellules NAUSICAA permet de prendre en compte la variation du flux scalaire (discrétisation r, φ) et donc de chiffrer cet effet.

En ce qui concerne l'effet PO/P1, représentatif de l'effet d'anisotropie du courant à la surface de la cellule, les résultats NAUSICAA confirment ceux d'EURYDICE : la prise en compte de cet effet accroît l'efficacité de l'absorbant (de l'ordre de 1.5 %).

Il faut remarquer que l'option P1 est extrêmement pénalisante à cause de son surcoût en temps de calcul d'une part (environ 3 fois plus fort que PO) et de son incompatibilité avec l'option "mélange" d'autre part.

L'effet de la discrétisation spatiale des cellules en secteurs est visible si l'on compare NAUSICAA PO (ou P1) à EURYDICE DP-O (ou DP-1). Cet effet représente 3 % sur l'antiréactivité du poison et sur le rapport des flux moyens thermiques.

Nous vérifions par ailleurs que la suppression des secteurs dans le calcul NAUSICAA PO conduit aux mêmes résultats que ceux du calcul EURYDICE DP-O (Voir tableau ci-dessous).

		$\frac{\overline{\varnothing}Gd}{\overline{\varnothing}}$ rapide	$\frac{\overline{\varnothing}Gd}{\overline{\varnothing}}$ thermique	$\frac{\Sigma a\overline{\varnothing}Gd}{\Sigma a\overline{\varnothing}}$
Calcul de référence	MARSYAS	0,9643	0,6159	2,7984
Ecart par rapport à la référence $\frac{X\text{-réf}}{réf}$ en %	NAUSICAA PO (secteur)	- 1.5	- 1.6	- 2.1
	NAUSICAA PO (sans secteur)	- 1.3	+ 1.3	+ 1.0
	EURYDICE DP-O	- 0.9	+ 1.3	+ 1.0

Nous constatons que l'amélioration progressive des hypothèses multicellules conduit à un calcul NAUSICAA P1 très précis : l'effet en réactivité du poison devient comparable à celle calculée avec de véritables P_{IJ} à deux dimensions (calcul MARSYAS).

Cette amélioration porte principalement sur le niveau de flux dans l'absorbant ; dans le tableau 20 nous constatons en effet que l'erreur NAUSICAA sur le taux de réaction du poison est supérieure à l'erreur sur le flux moyen. Ceci résulte d'une erreur sur le calcul du spectre thermique : dans les groupes les plus thermiques, l'absorbant devient de plus en plus noir et les erreurs induites par les hypothèses multicellules s'accroissent. Cet effet devient particulièrement important pour des poisons plus efficaces comme les grappes de commande en AIC /33/.

A titre d'exemple, nous présentons les écarts NAUSICAA PO/ MARSYAS pour les flux des différents groupes thermiques (cas à 200 mg/cm3 de Gd_2O_3).

GROUPE g	Poids en flux $\frac{\phi g}{\phi th}$ (%)	Poids en absorption $\frac{(\Sigma a\phi)g}{\sum_g (\Sigma a\phi)g}$ (%)	Erreur sur ϕg (%) $\frac{\phi gNAUS-\phi gMAR}{\phi gMAR}$	Erreur moyenne sur ϕth (%)	Erreur sur $(\Sigma a\phi)th$ (%) $\frac{(\Sigma a\phi)NAUS-(\Sigma a\phi)MAR}{(\Sigma a\phi)_{th}^{MAR}}$
0.352eV < E < 0.625eV	20.9	3.0	- 0.4	- 1.6	- 2.0
0.077eV < E < 0.352eV	47.0	42.4	- 1.6		
0eV < E < 0.077eV	32.1	54.5	- 2.4		

Nous vérifions que l'accroissement du poids en absorption des neutrons très thermiques (forte section de capture des isotopes impairs de gadolinium) conduit à une erreur plus importante sur l'efficacité du poison que sur le niveau moyen de flux thermique.

IV.4.3 b) Distributions de puissance (Cf. tableau 21)

Nous constatons que l'hypothèse de ROTH ne permet pas d'obtenir avec précision la puissance dans les crayons combustibles entourant le poison (sous-estimation par le calcul de 2.5 %).

L'utilisation de modules multicellules plus précis réduit à cette erreur à moins de 1 %, ce qui est satisfaisant.

IV.4.3 c) Conclusion

Cette étude a montré que l'élimination des hypothèses multicellules habituellement utilisées permet de calculer un effet en réactivité de l'absorbant cohérent avec les résultats d'un calcul 2D (MARSYAS).

Cependant, le calcul multicellules NAUSICAA P1 présente un coût de calcul prohibitif pour les études de projet ou d'interprétation d'expérience.

On est donc amené à choisir un module plus performant au niveau du temps de calcul, mais permettant d'obtenir une précision acceptable. Notre étude montre que cet optimum dans le rapport précision/prix est réalisé par le module EURYDICE dans son option ROTHx4. Ceci résulte d'une "heureuse" compensation entre la non-prise en compte de la variation azimutale du flux scalaire (+ 3 % sur le taux de réaction du poison) et les erreurs de cylindrisation et d'hypothèse d'isotropie du courant d'interface (respectivement 1.6 % et 1.4 %).

IV.4.4 - Etude de la configuration avec 9 crayons UO_2-Gd_2O_3

Nous venons de traiter la configuration avec un crayon UO_2-Gd_2O_3, nous allons maintenant étudier la configuration avec 9 crayons UO_2-Gd_2O_3 qui est représentative de la grappe.

Pour ceci, nous avons choisi un motif multicellules 17 x 17 représenté en figure 24. Le découpage géométrique des cellules utilisé pour les différents modules est donné en figure 25. Les calculs sont effectués à 7 groupes d'énergie (déjà définis pour le calcul de la configuration avec 1 crayon UO_2-Gd_2O_3) à laplacien critique imposé.

Ce découpage en énergie reste valable pour ce cas comme le montre le tableau 22.

Nous n'avons pas dans cette configuration de calcul MARSYAS du fait de l'étendue du motif étudié (temps de calcul des P_iI_jJ prohibitif).

De même, l'option P1 de NAUSICAA étant incompatible avec l'option "mélange" indispensable au calcul des 289 cellules, nous sommes limités au calcul multicellules NAUSICAA PO.

Nous nous sommes heurtés au même problème pour l'option DP-1 de EURYDICE.

Le tableau 23 montre la comparaison des flux moyens dans les hétérogénéités calculés par les différentes options pour les cas à 9 crayons UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3) et 9 crayons UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 (300 mg/cm3).

Le tableau 24 donne les taux de fission par cellule toujours dans les deux cas cités précédemment.

Le calcul NAUSICAA PO a été choisi comme calcul de référence pour la configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 (en effet, ce module avait été conseillé auparavant pour les calculs de grappes absorbantes dans une étude décrite en /33/).

On retrouve pour les crayons UO_2 - Gd_2O_3 périphériques, les mêmes tendances que dans l'étude multicellules avec 1 crayon UO_2 - Gd_2O_3 :

- Les écarts sur les flux moyens dans les cellules UO_2 - Gd_2O_3 et sur les taux de fission dans les cellules du réseau par rapport à NAUSICAA PO sont pratiquement semblables pour les deux cas traités.

- La dépression de flux des crayons absorbants est surestimée par le module ROTH. (l'écart est de - 3 % environ à NAUSICAA PO). L'anti-réactivité de ces crayons est sous-estimée de 3 %.

- L'emploi du module EURYDICE dans son option ROTHx4 améliore nettement les résultats : l'antiréactivité de ces crayons n'est plus sous-estimée que de 0.6 %.

- Les écarts obtenus avec le calcul EURYDICE DP-0 par rapport à NAUSICAA PO sont également faibles (surestimation de 1.4 %) pour les crayons UO_2 - Gd_2O_3 périphériques ; l'effet de la discrétisation du flux intégral est donc ici moins fort que pour un crayon absorbant unique.

- En ce qui concerne le crayon absorbant central, on peut faire les remarques suivantes :

  . L'erreur liée à l'hypothèse de ROTH est encore plus importante : elle représente ici près de 5 % par rapport au calcul NAUSICAA PO.

  . Le calcul EURYDICE ROTHx4 permet de prendre en compte ces effets d'interaction 2D entre crayons poisons : l'erreur est la même que pour les poisons périphériques et est inférieure à - 0.5 %.

  . Si l'on supprime la cylindrisation des cellules (EURYDICE DP-0), le calcul donne maintenant un taux de réaction pour l'absorbant supérieur à celui de NAUSICAA PO (de l'ordre de + 1.5 %).

Sur le tableau suivant qui rassemble ces chiffres, on peut voir que l'effet d'ombre est de mieux en mieux calculé si les hypothèses utilisées dans les calculs sont de plus en plus rigoureuses.

MODELE UTILISE	Ecart 1*	Ecart 2**	Ecart 2 - Ecart 1
Multicellule classique "ROTH"	- 1.2	- 4.7	- 3.5
EURYDICE ROTHx4	+ 1.5	- 0.4	- 1.9
EURYDICE DP-0 (Option mélange)	+ 3.1	+ 1.9	- 1.2

A l'erreur liée au calcul de la structure fine vient s'ajouter l'erreur du calcul de l'effet d'ombre. Celui-ci est un effet à deux dimensions et il est très mal calculé par le module MULTICELLULE classique de ROTH.

Les calculs EURYDICE (options DP-0 ou ROTHx4) prennent mieux en compte cet effet.

L'étude de la configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 confirme donc l'intérêt d'utiliser le module EURYDICE (options DP-0 et ROTHx4) dans le calcul des hétérogénéités absorbantes et notamment pour les études d'antiréactivité de grappes.

En effet, les résultats obtenus avec les options ROTHx4 et DP-0 du module EURYDICE sont très proches de ceux obtenus avec le module NAUSICAA P0. De plus le coût du calcul EURYDICE DP-0 ou ROTHx4 est inférieur à celui du calcul NAUSICAA P0.

---

* Ecart en % sur l'antiréactivité du crayon UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3) par rapport à NAUSICAA P0 dans la configuration avec 1 crayon UO_2-Gd_2O_3.

** Ecart en % sur l'antiréactivité du crayon central UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3) par rapport à NAUSICAA P0 dans la configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3.

Nous rappelons d'autre part, que seul le module "BIHET" d'EURYDICE permet, de plus, le traitement d'un absorbant sous forme de grains et que ce module ne peut être activé qu'avec les options ROTH et ROTHx4.

IV.4.5 - Conclusions

L'étude comparative des différentes options multicellules du code APOLLO (MULTICELLULES ROTH, EURYDICE, NAUSICAA, MARSYAS) nous a permis de mettre en évidence l'effet des différentes approximations du calcul des $P_i I_j J$ sur la détermination de la structure fine du flux et sur les effets d'antiréactivité dans le cas d'une perturbation essentiellement thermique (en effet le gadolinium est surtout absorbant dans le domaine thermique et les deux cas traités ici sont extrêmement voisins).

Les résultats obtenus ont montré que le module MULTICELLULE classique de ROTH pouvait entraîner des erreurs de l'ordre de 5 % sur l'antiréactivité de la grappe.

L'option ROTHx4 du module EURYDICE donne des résultats très acceptables pour un faible coût de calcul. Cette option est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'activer le module "BIHET" pour le traitement des absorbants sous forme de grains.

Les options P1 de NAUSICAA et DP-1 d'EURYDICE offrent de grandes possibilités et prennent en compte l'effet de l'anisotropie du courant mais entraînent un surcoût important en temps de calcul.

MARSYAS donne des calculs de référence mais le coût du calcul est trop élevé compte tenu des faibles écarts obtenus avec les modules NAUSICAA (P1 ou P0) et EURYDICE (DP-1 ou DP-0 ou ROTHx4).

Pour traiter le cas d'une grappe nécessitant une étendue relativement importante du motif multicellules à étudier, le module EURYDICE (Options DP-0 ou ROTHx4) apparaît donc comme la solution la mieux adaptée à ce problème.

V. INTERPRETATION DES MESURES PAR OSCILLATIONS ET DES MESURES D'EFFICACITE DE GRAPPES

A - Interprétation des mesures par oscillations

V.1 - Obtention de l'effet en réactivité expérimental

V.1.1 - Choix d'un échantillon de référence

Lors d'une mesure par oscillations d'un échantillon X, on obtient le signal S tel que :

$$S = \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} S_X + S_{TH} - S_{TB}$$

avec les notations suivantes :

S_{TH} = Signal donné par le train haut,
S_{TB} = Signal donné par le train bas,
S_X = Signal donné par l'échantillon X.

Afin d'éliminer les erreurs systématiques éventuelles (signaux S_{TH} et S_{TB}, effet de bout de canne ....), nous sommes conduits à ne prendre en compte que la différence entre des mesures d'échantillons différents.

Ceci nous oblige donc à choisir un échantillon référence. Pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3, la référence sera l'échantillon D9 (alumine pure) et pour les séries UO_2 - Gd_2O_3 l'échantillon C8 (UO_2 à 3 %).

On rappelle que les corrections liées à l'appareillage (transitoires, légère dérive de la puissance, etc ...) sont effectuées directement lors du dépouillement des résultats sur le calculateur PDP.

V.1.2 - Corrections nécessaires à l'interprétation

L'utilisation des résultats d'oscillations serait immédiate si les échantillons étaient tous physiquement comparables à l'échantillon référence. Or, comme cela a été décrit au paragraphe III, les échantillons présentent de légères différences de masse de gainage et également de longueur. Par ailleurs, comme il s'agit essentiellement d'échantil-

lons absorbants de hauteur finie, on est conduit à corriger les résultats expérimentaux d'un certain "effet de bout" que l'on définira par la suite.

On doit donc effectuer trois corrections sur les résultats bruts donnés précédemment :

- la première correction, dite correction de masse de gainage rend comparables les échantillons d'une même série en prenant en compte les imperfections de gainage,

- la deuxième correction, dite correction d'"effet de bout", est particulière aux échantillons absorbants et permet de s'affranchir de la hauteur finie des échantillons,

- la troisième correction, dite correction de longueur, permet de comparer les résultats qui auraient été obtenus avec des échantillons de longueur uniforme.

V.1.2.1 - Correction de masse de gainage

Il s'agit de la différence de masse de gainage entre les différents échantillons (Al_2O_3 - Gd_2O_3 et UO_2 - Gd_2O_3) et l'échantillon référence. Pour effectuer les corrections, nous utiliserons la valeur suivante, donnée en unité de mesure, pour un gramme de zircaloy :

$$SK_{Zr} = -13$$

Cette correction est négligeable pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 et UO_2 - Gd_2O_3 car les masses de gainage des différents échantillons sont extrêmement voisines.

V.1.2.2 - Correction d'"effets de bout"

a) Nature du problème

L'absorption des neutrons dans un barreau très absorbant est plutôt un effet de surface qu'un effet de volume. Lors des mesures par oscillations, l'échantillon est situé entièrement dans le coeur du

massif expérimental. C'est sur la surface extérieure totale (surface apparente) de la colonne de pastilles gadoliniées présente dans l'échantillon que sont absorbés les neutrons. Or, le calcul d'interprétation est réalisé pour des absorbants de hauteur infinie sans extrémités haute et basse. Les signaux obtenus expérimentalement prennent en compte cet effet que l'on appellera "effet de bout".

Comme cet effet varie avec la longueur de l'échantillon, des échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 de hauteurs différentes ont été oscillés dans MINERVE ; on a ainsi une étude paramétrique de cet effet.

b) Détermination du facteur correctif de "l'effet de bout"

Les résultats des mesures brutes sont rappelés dans le tableau 25 (signaux S). La valeur du facteur correctif de l'effet de bout sera obtenue après les étapes suivantes :

b1) Correction alumine

Les signaux bruts correspondent à un effet lié d'une part à l'alumine et d'autre part au gadolinium. Pour s'affranchir du premier effet, on a ramené tous les signaux bruts à des signaux qu'on aurait obtenus avec des échantillons constitués du même nombre de pastilles d'alumine. L'effet expérimental de l'alumine a été obtenu grâce aux mesures des échantillons D9 et D11.

Le tableau 25 montre l'effet de cette correction (signaux S').

b2) Effet du gadolinium

Les signaux S' du tableau 25 sont donc relatifs à des échantillons contenant tous le même nombre de pastilles d'alumine mais un nombre de pastilles d'Al_2O_3 - Gd_2O_3 différent. L'effet dû au gadolinium est alors obtenu en faisant la différence entre les signaux S' et le signal de l'échantillon F13 qui ne contient que de l'alumine. On obtient alors les signaux S".

b3) Correction de longueur

On ramène tous les signaux S" à des signaux d'échantillons contenant une seule pastille d'Al_2O_3. On prend en compte la variation axiale du poids en réactivité avec la cote z (poids en $\emptyset\emptyset^+$).

On obtient alors les signaux $S^{(N)}$ définis par :

$$S^{(N)} = \frac{S''}{N} \times \frac{\int_{-e/2}^{e/2} \emptyset_o^2 dz}{\int_{-e/2}^{+e/2} \emptyset^2 \, dz}$$

avec les notations suivantes :

e = hauteur de l'empilement de pastilles Al_2O_3 - Gd_2O_3

N = nombre de pastilles d'Al_2O_3 - Gd_2O_3

$\emptyset = \emptyset_o \cos Bz$

avec $B = \frac{\Pi}{He}$ He = hauteur extrapolée = 800 mm

La figure 26 représente les signaux $S^{(N)}$ pour 3 teneurs en Gd_2O_3 différentes en fonction de la hauteur de l'échantillon.

b4) Facteur correctif de l'effet de bout

Sur la figure 26, on remarque que les courbes tendent vers une asymptote correspondant à une valeur du signal sans effet de bout (ce qui serait obtenu avec un signal de hauteur infinie). Nous désignons cette valeur asymptotique par S_∞. Les signaux expérimentaux les plus proches de S_∞ dont nous disposons sont ceux concernant les échantillons à 7 pastilles. Afin d'obtenir une valeur de S_∞, nous nous sommes normés en écrivant :

$$\frac{S_7 - S_\infty}{S_\infty} = \alpha$$

où α est une constante indépendante de la teneur en Gd_2O_3. Cette normalisation est justifiée pour 2 raisons : d'une part, si le poison est "noir", l'"effet de bout" est pratiquement indépendant de la teneur en Gd_2O_3 ; d'autre part, la figure 26 montre que le rapport :

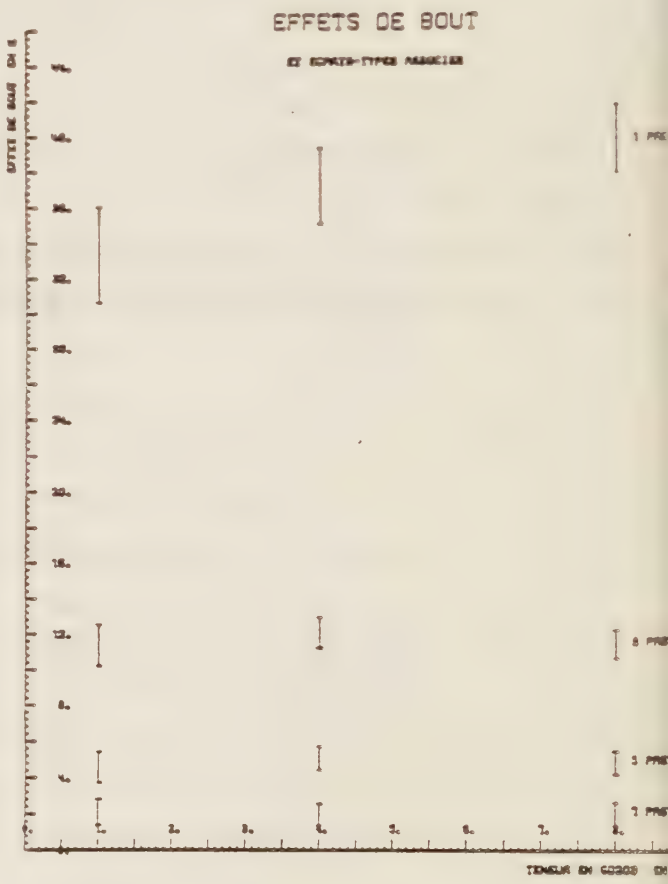
$\frac{S_{(z)} - S_\infty}{S_\infty}$ pour une hauteur quelconque z de l'échantillon, est indépendant de la charge en gadolinium.

Le facteur correctif d'"effet de bout" expérimental relatif à une teneur t en Gd_2O_3 et un nombre N de pastilles gadoliniées est défini par :

$$f_{N,t} = \frac{S_t^{(N)} - S_\infty}{S_\infty}$$ où les notations signifient :

$S_t^{(N)}$ = signal $S^{(N)}$ (défini précédemment) pour une teneur t.
S_∞ = signal $S^{(N)}$ pour $N \to \infty$

La figure ci-contre représente $f_{N,t}$ pour les échantillons de la série F. Pour la charge minimale à 40 mg/cm3 (échantillon à 1 % en Gd_2O_3), cette figure montre qu'on est à la limite de la "noirceur" : l'effet de bout devient légèrement plus faible comme cela est apparent sur le résultat associé à l'échantillon le plus court.



Dans le cas d'un poison suffisamment noir, l'hypothèse de proportionnalité entre l'absorption des neutrons par le poison et la surface apparente du poison est réaliste. On peut alors définir un effet de bout "théorique", noté $f_N^{théo}$, relatif à un échantillon de rayon R et de hauteur H, tel que :

$f_N^{théo} = \frac{2\pi R^2}{2\pi RH} = \frac{R}{H}$ avec H = Nh pour N pastilles de hauteur h.

Cet effet s'annule bien dans le cas d'un échantillon de hauteur infinie.

On montre sur la figure 27 la variation des facteurs $f_{N,t}$ et $f_N^{théo}$ pour des teneurs de 4 % et 8 % en Gd_2O_3 en fonction de la hauteur de l'échantillon.

Par rapport au modèle théorique, on obtient une pente plus forte pour la courbe expérimentale ; néanmoins les points expérimentaux encadrent bien la courbe théorique dans la gamme de hauteurs qui nous intéresse. On peut donc conclure que :

- notre étude expérimentale montre l'importance des "effets de bouts" dans l'effet en réactivité mesuré ; les échantillons oscillés sont un peu courts : la correction représente de l'ordre de 10 %.

- Ces effets sont sensiblement différents de ceux fournis par le modèle théorique très sommaire utilisé ici : en effet, ce modèle ne prend pas en compte la différence de flux (niveau et spectre) intervenant en réalité sur chaque face de l'absorbant.

En ce qui concerne nos échantillons d'oscillations, on donne dans le tableau ci-dessous leurs hauteurs respectives dans les différentes séries.

Support	Al_2O_3		UO_2		
Série	B	D	A	C	E
Hauteur en mm	36	36	44,4	40	40

Pour l'interprétation des mesures par oscillations, nous prendrons pour la valeur attribuée à l'"effet de bout" :

- une valeur constante quelque soit la teneur en Gd_2O_3, pour une hauteur donnée,
- la décroissance de l'effet de bout sera prise sur la courbe expérimentale.

Le tableau suivant donne les valeurs de f associées aux différentes séries d'échantillons (Cf. figure 27).

Support	Al_2O_3		UO_2		
Série	B	D	A	C	E
f (%)	8* ± 1	11 ± 1	7* ± 1	8,5 ± 1	8,5 ± 1

* Variable suivant la taille des grains

V.1.2.3 - Correction de longueur

Les échantillons UO_2 - Gd_2O_3 (série A : 44,4 mm) n'ont pas la même longueur que celle de l'échantillon référence C8 (série C : 40 mm).

On construit donc l'échantillon théorique correspondant de longueur ℓ_R (longueur référence), en ajoutant à ℓ_x (longueur de l'échantillon X) une masse réduite de matériau m_a.

On a : $$ma = \frac{\ell_R}{\ell_x} M_A = k_M \cdot M_A$$

Le signaux correspondants sont :

$$s = k_s \times S$$

Les facteurs k_s qui tiennent compte à la fois de la réduction de longueur et de la variation de sensibilité axiale à l'effet en réactivité, sont obtenus de la façon suivante :

Pour l'effet en réactivité, la sensibilité en un point de cote z est proportionnelle au produit du flux par le flux adjoint :

$$S_{(z)} = K \cdot \phi(z)\, \phi^{+}(z)$$

On montre que ces grandeurs peuvent être représentées dans la zone de mesure par des fonctions simples :

$$\phi(z) = \phi(o) \cos(Bz)$$

et $\phi^{+}(z) = \phi(o) \cos(Bz)$

avec $B = \frac{\Pi}{He}$ où He est la hauteur extrapolée qui vaut 80 cm (résultat obtenu lors de précédentes expériences).

La correction de longueur sur les effets en réactivité consiste à multiplier les différences de signaux par le facteur correctif :

$$k_s = \frac{\int_{-\ell_R/2}^{+\ell_R/2} \cos^2(Bz)\,dz}{\int_{-\ell_x/2}^{+\ell_x/2} \cos^2(Bz)\,dz}$$

Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs de k_s pour les différentes séries d'échantillons. (le facteur k_S permet de ramener tous les échantillons à une hauteur de 40 mm).

Série	A	B	C	D
K_s	0,900	1,111	1	1,111

V.2 - Obtention de l'effet en réactivité par le calcul

V.2.1 - Calcul de l'effet en réactivité en théorie des perturbations

L'équation de bilan du cas non perturbé, en supposant les collisions isotropes s'écrit :

$$0 = \Sigma_t (x, E)\, \phi (x, E) - \int dx'\, P^E (x', x) \int \Sigma_{sx'} (E' \to E)\, \phi (x', E')\, dE' - \lambda \int dx'\, \chi (x', E)\, P^E (x', x) \int \Sigma_f (x', E')\, \phi (x', E')\, dE' \quad (1)$$

où $P^E (x', x)$ est la probabilité pour un neutron né au point x', avec une énergie E, de subir sa première collision au point x.

Les autres termes ont la signification habituelle.

A partir des conditions d'orthogonalité, on peut montrer que l'équation donnant le flux adjoint peut s'écrire sous la forme :

$$0 = \Sigma_t (x, E) \cdot \Phi^+ (x, E) - \int dx'\, P^{E'} (x, x') \int dE'\, \Sigma_{sx'} (E \to E')\, \phi^+ (x', E')\, dE' - \lambda \int dx' v\, \Sigma_f (x, E) . P^{E'} (x, x') \int \chi (x, E')\, \phi^+ (x', E') \quad (2)$$

L'équation directe de l'état perturbé est :

$$0 = \tilde{\Sigma}_t (x, E)\, \tilde{\phi} (x, E) - \int dx'\, \tilde{P}^E (x', x) \int dE'\, \tilde{\Sigma}_{sx'} (E' \to E)\, \tilde{\phi} (x', E')\, dE' - (\lambda + \Delta\lambda) \int dx'\, \tilde{\chi} (x', E)\, \tilde{P}^E (x', x) \int \tilde{\Sigma} f (x', E')\, \tilde{\phi} (x', E')\, dE' \quad (1a)$$

En multipliant l'équation (2) par $\tilde{\phi} (x, E)$ et faisant l'intégration sur tout l'espace et l'énergie, nous obtenons :

$$0 = \int dx\, dE\, \tilde{\phi} (x,E)\, \Sigma_t (x,E)\, \phi^+ (x,E) - \int dx\, dE\, \tilde{\phi} (x,E) \int dx'\, P^{E'} (x,x') \int dE'\, \Sigma_{sx} (E \to E')\, \phi^+ (x', E')\, dE' - \lambda \int dx\, dE\, \tilde{\phi} (x,E) \int dx'\, P^{E'} (x,x') .\nu\Sigma_f (x,E) \int \chi (x,E')\, \phi^+ (x',E')\, dE' \quad (3)$$

Nous pouvons définir une fonction $\psi(x,E')$ par :

$$\psi(x,E') = \int dx' \; P^{E'} \; (x' \to x) \;\; \emptyset \; (x', \; E') \qquad (4a)$$

et

$$\psi^{+} \; (x, \; E') = \int dx' \; . \; P^{E'} \; (x \to x') \; \emptyset^{+} \; (x',E') \qquad (4b)$$

Nous discuterons de la signification de ces fonctions plus loin.

L'équation (3) peut s'écrire sous la forme :

$$0 = \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x, \; E) \; \Sigma_t \; (x,E) \; \emptyset^{+} \; (x,E)$$

$$- \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset}(x,E) \int dE' \; \Sigma_{s \; x} \; (E \to E') \; \psi^{+} \; (x,E')$$

$$- \lambda \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; \chi \; (x,E') \; .\nu \; \Sigma_f \; (x,E) \; . \; \psi^{+} \; (x, \; E') \qquad (3a)$$

En multipliant l'équation (1a) scalairement par $\emptyset^{+} \; (x, \; E)$ et en interchangeant les variables x, x' et E, E', on trouvera :

$$0 = \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \; \tilde{\Sigma}_t \; (x,E) \; \emptyset^{+} \; (x,E)$$

$$- \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; \tilde{\Sigma}_{sx} \; (E \to E') \; \psi^{+} \; (x,E')$$

$$- (\lambda + \Delta \lambda \;) \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; \tilde{\chi} \; (x,E') \nu \; \tilde{\Sigma}_f \; (x,E) \; \tilde{\psi}^{+} \; (x,E')$$

On peut alors calculer la variation de réactivité $\Delta\lambda$ par l'équation :

$$\Delta \lambda = \frac{1}{D} \Big[\int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \; \Delta \; \Sigma_t \; (x,E) \; \emptyset^{+} \; (x,E)$$

$$- \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; (\Delta \; \Sigma_{sx} \; (E \to E') + \Delta \; (\chi(x,E') \; .\nu\Sigma_f \; (x, \; E))) \; \psi^{+} \; (x,E')$$

$$- \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; (\Sigma_{sx} \; (E \to E') + \tilde{\chi}(x,E') \; .\nu\Sigma_f \; (x,E) \; . \; \Delta \; \psi^{+}(x,E') \Big] \qquad (5)$$

où

$$D = \int dx \; dE \; \tilde{\emptyset} \; (x,E) \int dE' \; \tilde{\chi} \; (x,E') \; \nu \; \Sigma_f \; (x,E) \; \tilde{\psi}^{+} \; (x,E')$$

$$\tilde{\psi}^{+} \; (x,E) = \int dx' \; \tilde{P}^{E} \; (x \to x') \; \phi^{+} \; (x', \; E')$$

$$\Delta \; \tilde{\psi}^{+} \; (x,E') = \int dx' \; \Delta \; \tilde{P} \; (x \to x') \; \Phi^{+} \; (x' \; . \; E')$$

- Calcul de l'effet en réactivité d'une perturbation localisée

L'équation (5) donne directement l'effet en réactivité. L'intégration est limitée sur le volume perturbé.

Nous avons deux fonctions d'importance : Φ^+ (x,E) représente l'importance d'un neutron subissant une collision au point x, et ψ^+ (x,E) qui représente l'importance d'un neutron né au point x.

- Application aux expériences d'oscillations

Pour une perturbation localisée, ce qui est le cas dans l'expérience d'oscillations, on peut appliquer l'équation (5) pour le calcul d'effet en réactivité. L'intégration du premier terme est limitée au volume de l'échantillon perturbé. Le deuxième terme demande le calcul de la fonction ψ^+ (x,E) pour le cas non perturbé. Le troisième terme tient compte de la variation de la fonction ψ^+ (x,E) due à la perturbation.

a) Remplacement d'un échantillon absorbant par un autre échantillon absorbant

C'est le cas des échantillons de gadolinium. Les termes qui contiennent la fonction ψ^+ (x,E) sont négligeables, puisque $\nu\Sigma_f$ de l'échantillon est nul et Σ_s (E' → E) peut être négligé.

b) Echantillons fissiles ou de combustible irradié

Lors du remplacement d'un échantillon fissile par un autre échantillon fissile ou de combustible irradié, on peut constater que $\Delta\psi^+$ est négligeable à haute énergie, car le spectre de fission est pratiquement le même, ainsi que la probabilité de sortir de l'échantillon qui est peu influencée.

A basse énergie, c'est le terme de production ($\tilde{\chi}$(E) . $\nu\Sigma_f$) lui même qui est négligeable.

Alors le terme en :

$$\int dx\, dE\, \tilde{\emptyset}\,(x, E) \int dE' \,.\, \tilde{\chi}\,(x, E') \,.\nu\tilde{\Sigma}_f\,(x,E) \,.\, \Delta\,\tilde{\psi}^+\,(x, E)$$

est négligeable.

Si on néglige l'effet du transfert énergétique par rapport à l'effet total, on trouvera :

$$\Delta\lambda = \frac{1}{D}\left[\int\!\!\int dx\, dE\, \tilde{\phi}(x, E)\{\Delta\Sigma(x, E) \cdot \Phi^{+}(x, E) - \int\Delta(\chi(x, E') \cdot \nu\Sigma_f(x,E))\,\psi^{+}(x, E)\}\right]$$

c) Echantillon ralentisseur

C'est le terme de transfert énergétique pour ce type d'échantillon qui résulte d'une variation importante de la fonction $\psi^{+}(x, E)$. Dans ce cas, il faut tenir compte des trois termes de l'équation. Le cas d'un échantillon H_2O est un cas dans lequel on doit calculer la fonction $\psi^{+}(x, E)$ à partir des probabilités de collision de l'état perturbé.

V.2.2 - Présentation des calculs

Nous venons de voir que le calcul de l'effet en réactivité fait intervenir les termes suivants :

$\Delta\Sigma_t$ = Variation des sections macroscopiques totales.

$\tilde{P}$ = Opérateur de production des neutrons dans le cas perturbé.

ϕ^{+} = Flux adjoint du cas non perturbé.

$\tilde{\phi}$: Flux direct du cas perturbé.

Ces différents termes sont obtenus lors de calculs APOLLO détaillés au paragraphe V.2.2.b.

Nous allons tout d'abord déterminé un motif multicellules de base pour l'interprétation des mesures par oscillations.

a) Détermination du motif multicellules de base

L'introduction d'un échantillon absorbant au centre du massif Mélodie IV engendre une perturbation sur le flux et le spectre neutronique du réseau combustible. Dans nos calculs, nous ne représentons qu'une partie du réseau expérimental. Cependant, la dimension de celle-ci doit être choisie de telle manière qu'elle soit supérieure à l'étendue de la perturbation créée.

Le problème est traité en détail dans l'annexe B.

La figure 28 représente le motif multicellules adopté.

b) Calculs réalisés

On rappelle que les références adoptées sont l'échantillon D9 et l'échantillon C8 respectivement pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 et les échantillons UO_2 - Gd_2O_3.

La méthode utilisée pour obtenir l'effet en réactivité d'un échantillon par le calcul se déroule en plusieurs étapes :

- Tout d'abord, le calcul de l'échantillon référence donne le laplacien critique (B_c^2) de la configuration non perturbée et les sections macroscopiques associées.

  Tous les autres calculs sont effectués à laplacien critique (B_c^2) imposé.

- On calcule ensuite le flux adjoint du cas référence et le facteur $\chi\emptyset^+$.

- Enfin, on calcule le flux direct d'un cas perturbé ($\hat{\emptyset}$) ainsi que les sections macroscopiques qui lui sont liées.

On peut alors obtenir l'effet en réactivité $\Delta\rho$ qu'on rappelle :

$$\Delta\rho \# \frac{\langle \phi^+ , \Delta H \tilde{\phi} \rangle}{\langle \phi^+ , \tilde{P} \tilde{\phi} \rangle}$$

où $\Delta H = \Delta P - \Delta K$ avec ΔP = variation de l'opérateur production de neutrons

ΔK = variation de l'opérateur absorption de neutrons

Le dénominateur correspond à l'importance totale intégrée sur tout le réacteur ; cette quantité est pratiquement invariable pour de faibles perturbations.

Suite à l'étude du schéma de calcul du gadolinium, tous les calculs ont été réalisés avec le module EURYDICE du code APOLLO, dans ses options (ROTHx4, WIGNER). Quand le gadolinium se présentait sous forme de grains, on a utilisé le module "BIHET". Le motif muticellules sur lequel ont été réalisés les calculs a été décrit au paragraphe V.2.2.a. Nous présentons ci-dessous les calculs pour chaque série d'échantillons :

- Calculs effectués pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3

Il s'agit de la configuration R1.

La figure 29 montre les géométries de calcul des différentes cellules du réseau étudié. Nous avons découpé le crayon Al_2O_3 - Gd_2O_3 en 3 zones équivolumiques (Cf. Paragraphe IV.2). De plus, quand le gadolinium est introduit sous forme de grains dans l'alumine, nous n'avons pris qu'une seule zone dans ceux-ci ; ce choix est justifié par de nombreux tests /35/. La géométrie à grains est traitée avec le module BIHET (Cf. paragraphe IV.3).

- Calculs effectués pour les échantillons UO_2 - Gd_2O_3

Il s'agit de la configuration R2.

Les différentes géométries de calcul nécessaires au traitement de cette configuration sont rassemblées sur la figure 29. Celle-ci montre que nous avons divisé le crayon UO_2 - Gd_2O_3 en quatre couronnes de manière à respecter la géométrie hétérogène des échantillons de la série E : on aura ainsi deux couronnes équivolumiques dans la zone interne et deux couronnes équivolumiques dans la zone externe. Pour la série A comportant du gadolinium sous forme de grains, on ne considère qu'une seule zone dans ceux-ci. On a une couronne supplémentaire dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3 pour tenir compte de la variation de diamètre par rapport à l'échantillon C8. (Cf. Figure 29).

La figure 30 représente les flux ϕ, ϕ^+ pour l'échantillon C8 et le flux $\tilde{\phi}$ pour l'échantillon C4 (échantillon gadolinié à 300 mg/cm3).

V.3 - Interprétation des mesures et comparaison expérience-calcul

V.3.1 - Choix de la normalisation

L'interprétation des mesures d'effet en réactivité obtenues par oscillations nécessite la détermination d'un facteur de normalisation qui permet de passer des résultats calculés aux résultats expérimentaux. On prend souvent le rapport entre les valeurs expérimentales et calculées de l'effet en réactivité d'un corps dont on considère que les sections efficaces sont bien connues.

Comme les échantillons étalons enrichis en U235 ont été oscillés dans les configurations R1 et R2, nous disposons alors de plusieurs mesures de l'effet de l'U^{235}.

On donne dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus avec ces échantillons.

SIGNAL	EXPERIENCE	CALCUL	E/C ± Δ (E/C)
(C1 - C8)*	- 1940 ± 170	- 3,36126e-3	577170 ± 50580
(C1 - C5)*	- 1150 ± 170	- 2,01070e-3	571940 ± 84550
(C1 - C8)**	- 1740 ± 260	- 2,95027e-3	589780 ± 88130
(C1 - C5)**	- 1020 ± 260	- 1,74740e-3	583720 ± 148790

(*) Mesuré dans la configuration R1

(**) Mesuré dans la configuration R2

Plusieurs stratégies sont alors possibles pour obtenir un facteur de normalisation ; si on désigne par S_i^{exp} et S_i^{cal} les valeurs expérimentale et calculée de l'effet en réactivité pour l'échantillon i, on peut effectuer la normalisation des différentes manières suivantes :

- <u>Méthode des moindres carrés</u> :

  On écrit $S_i^{exp} = A\, S_i^{cal}$

  On obtient A en rendant minimum la somme : $\sum_i (S_i^{exp} - AS_i^{cal})^2$

- <u>Moyenne de l'ensemble</u>

  On prend $A = \dfrac{\sum_i S_i^{exp}}{\sum_i S_i^{cal}}$

- <u>La norme moyenne</u>

  A est la norme moyenne des normes A_i définies par :

  $$A_i = \frac{S_i^{exp}}{S_i^{cal}}$$

- Pondération inversement proportionnelle au carré des écarts-types

$$\text{On a } A = \frac{\sum_i \frac{\left(\frac{S_i^{exp}}{S_i^{cal}}\right)}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

Dans la référence /20/ on a testé les trois premières méthodes et on a observé que le choix de la normalisation expérience-calcul a un effet négligeable sur les résultats. La quatrième méthode donne également des résultats analogues à ceux obtenus avec les trois méthodes précédentes.

Nous avons considéré la dernière méthode car elle tient compte des incertitudes sur chaque mesure. On obtient : A = 579000

On définit alors l'écart-type associé par :

$$\Delta A = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \; N(N-1)}} = 11000$$

La précision sur la normalisation est donc de 1.9 %. Tout au long de l'interprétation des mesures par oscillations, nous adopterons donc la valeur :

$$A = 579000 \pm 11\,000$$

V.3.2 - Echantillons contenant du Gd_2O_3 cobroyé

V.3.2.1 - Echantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (Série D)

V.3.2.1.1 - Interprétation

Les signaux bruts apparaissent sur le tableau 26. Ces signaux ont été corrigés de l'effet de bout (11 %).

Les corrections de masse étant négligeables, seule une correction de taille intervient sur les signaux expérimentaux ; cette correction n'a lieu que pour les deux échantillons à 20 % et 40 %, de fabrication différente et dont les pastilles d'alumine gadoliniée ont un volume légèrement plus faible.

Les signaux corrigés de taille et d'effet de bout doivent ensuite être ramenés aux valeurs qu'ils auraient pour des hauteurs de 40 mm. (facteur de rapport d'importance $\int_{-20}^{+20} \cos^2 (B_z\, z)dz / \int_{-18}^{+18} \cos^2 (B_z\, z)dz$) ; en effet la normalisation à l'^{235}U a été réalisée sur des échantillons UO_2 de 40 mm de hauteur. De plus, ceci permet de rendre comparables les signaux de ces échantillons d'alumine gadoliniée à ceux des autres échantillons de la campagne (UO_2 - Gd_2O_3) en ramenant tous les échantillons à la même hauteur.

L'interprétation a donné les résultats rassemblés dans le tableau 26.

La comparaison expérience-calcul est représentée sur la figure 31. Le profil de la courbe d'effet en réactivité du gadolinium suggère les remarques suivantes :

- la pente des courbes est très forte pour une teneur en Gd_2O_3 comprise entre 0 et 1 % : c'est dans cette gamme où l'autoprotection est la plus faible (absorbant gris) mais varie le plus rapidement,

- ensuite, pour des teneurs variant de 1 à 12 %, on a une forte diminution de la pente correspondant à la saturation de la capture thermique des isotopes impairs du gadolinium,

- pour des fortes teneurs en Gd_2O_3, la pente des courbes s'accroît toujours mais faiblement. Ceci est dû à la contribution de la capture épithermique du gadolinium qui n'est plus négligeable : il devient nécessaire de prendre en compte la capture des neutrons par les isotopes du gadolinium dont le nombre de masse est pair (en particulier ^{156}Gd et ^{158}Gd) car pour ceux-ci, bien que la section efficace dans le domaine thermique soit faible, l'intégrale de résonance n'est pas négligeable.

  Par ailleurs, on a une forte augmentation de la capture épithermique du ^{155}Gd et du ^{157}Gd.

En ce qui concerne l'écart expérience-calcul, on constate que :

- dès que la saturation de la capture thermique intervient (teneurs en Gd_2O_3 supérieures à 2 %), l'écart expérience-calcul devient satisfaisant : la surestimation de l'ordre de quelques pour-mille, par le calcul, de l'antiréactivité introduite par le poison ne représente pas une tendance significative du fait de l'incertitude sur le niveau d'écart expérience-calcul introduite par les erreurs systématiques (± 4 % à 1 σ). Il n'apparaît pas de dérive importante pour les très fortes teneurs en Gd_2O_3,

- par contre, la forte surestimation de l'antiréactivité par le calcul pour les échantillons faiblement chargés en gadolinium n'est pas cohérente avec les résultats obtenus pour les autres échantillons et ne peut pas s'expliquer à partir des fluctuations liées aux erreurs aléatoires.

Il devient donc nécessaire d'effectuer une étude de sensibilité afin de déterminer quelle est la source d'incertitude dans le calcul permettant d'introduire une pareille erreur.

V.3.2.1.2 - Etude de sensibilité

L'erreur de calcul sur le taux de réaction du crayon gadolinié provient d'une part de l'erreur de flux dans l'absorbant et d'autre part des sections efficaces des différents isotopes du gadolinium utilisées dans le calcul.

Pour comprendre la sensibilité des résultats aux variations des sections (notamment épithermiques), il est nécessaire de connaître la répartition des captures dans le poison entre les différents isotopes et les différents domaines d'énergie. A cet effet, nous présentons dans le tableau 27 la contribution des différents isotopes (taux de réaction épithermique et thermique) à la capture du gadolinium en fonction de la teneur. Nous constatons que pour les trois premiers échantillons faiblement chargés (moins de 200 mg/cm3) la capture du gadolinium est essentiellement thermique : la capture épithermique reste inférieure à 4 %. Le domaine rapide ne donne une contribution appréciable supérieure à 10 % qu'aux teneurs élevées (supérieures à 700 mg/cm3 de Gd_2O_3) donc supérieures à celles de projet. La prise en compte précise des phénomènes épithermiques devient alors nécessaire : prise en compte dans le calcul, d'une part des isotopes pairs et d'autre part de l'autoprotection des résonances des isotopes impairs.

En complément, nous donnons dans le tableau 28, la répartition (en pour-cents et pour chaque isotope du gadolinium) des domaines rapide et thermique pour l'absorption des échantillons gadoliniés.

V.3.2.1.2.1 - Sensibilité de l'effet en réactivité aux sections du ^{155}Gd et du ^{157}Gd

A) Sensibilité aux sections thermiques

Le but de cette étude est essentiellement l'obtention de la sensibilité aux sections thermiques du gadolinium. A cet effet, nous avons augmenté uniformément les sections thermiques (dans les groupes d'énergie inférieure à 0,625 eV) des isotopes impairs de 5 %, incertitude réaliste à associer à la section effective thermique du gadolinium.

Pour mieux préciser le phénomène aux très faibles teneurs, on a effectué un calcul supplémentaire pour une charge de 0.3 % en Gd_2O_3, inférieure à celle du premier échantillon (D1).

Afin de pouvoir comparer les sensibilités respectives dans les domaines thermique et rapide, nous avons ensuite modifié de + 5 % les sections rapides de ces mêmes isotopes. Nous présentons ci-dessous les variations correspondantes de l'effet en réactivité pour les différentes teneurs en Gd_2O_3 :

Teneurs en Gd_2O_3 (%)		0.3	1	2	4	8	12	16	22	40
Modification	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ thermique = 5 %	2.21	1.01	0.64	0.45	0.33	0.27	0.23	0.18	0.10
	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ rapide = 5 %	0.02	0.05	0.09	0.15	0.24	0.31	0.37	0.46	0.64

Du fait des très fortes sections thermiques de ces isotopes impairs, le crayon gadolinié est rapidement noir avec l'accroissement de la charge en poison et la sensibilité aux sections thermiques devient très faible pour les teneurs comprises entre 8 % et 16 % correspondantes au projet. Les erreurs introduites par les sections thermiques interviennent essentiellement pour les faibles teneurs rencontrées dans les expériences (échantillon D1 à 1 % de Gd_2O_3) ou dans des crayons gadoliniés ayant "brûlés" en partie.

En fait, au temps zéro, pour les teneurs en Gd_2O_3 utilisées dans les PWR, la source d'incertitude liée aux sections rapides est plus forte : l'incertitude sur les sections, qu'on peut évaluer à 20 %, introduit une incertitude de 1.5 % sur l'antiréactivité introduite par un crayon chargé à 700 mg/cm3 en Gd_2O_3. Ceci nous conduit à mieux préciser les incertitudes liées à la capture épithermique et à les découpler.

B - SENSIBILITE AUX SECTIONS EPITHERMIQUES

a) Isotopes impairs du gadolinium

Pour les fortes teneurs, du fait de l'importance de leur capture épithermique, le niveau d'intégrale de résonance utilisé devient donc fondamental ainsi que la prise en compte de leur autoprotection.

Pour découpler ces deux sources d'incertitudes et intercomparer les bibliothèques de sections actuellement disponibles, nous avons procédé de la manière suivante. Nous effectuons un calcul de référence (isotopes 100155 et 200157 proposés par M. NASR et autoprotégés par le jeu de sections effectives 1155 et 1157) ; à partir de ce calcul, nous introduisons successivement des modifications de bibliothèques :

(1.) Nous supprimons l'autoprotection en imposant les sections efficaces I_R^{1155} et I_R^{1157} correspondant à une section équivalente infinie.

(2.) Nous enlevons totalement le jeu de sections effectives ; cela revient à étudier l'effet lié à la différence d'intégrales de résonance : $I_R^{1155} \rightarrow I_R^{100155}$ et $I_R^{1157} \rightarrow I_R^{200157}$.

(3.) Les sections 200157 proposées par M. NASR et RIBON sont remplacées par l'ancien jeu APOLLO 100157, correspondant à la bande ENDF/BIII.

Ces calculs nous permettent d'obtenir les variations de l'effet en réactivité du crayon gadolinié pour ces différents effets (présentés ci-dessous en pour-cents), et donc une estimation du niveau d'incertitude introduit par le domaine épithermique.

Teneur en Gd_2O_3 (%)	1	2	4	8	12	16	22	40
(1) Effet d'autoprotection	+ 0.02	+ 0.04	+ 0.07	+ 0.15	+ 0.27	+ 0.40	+ 0.64	+ 1.50
(2) $I_R^{1157} \rightarrow I_R^{200157}$	- 0.04	- 0.08	- 0.15	- 0.26	- 0.38	- 0.48	- 0.60	- 0.90
(3) $I_R^{200157} \rightarrow I_R^{100157}$	+ 0.18	+ 0.34	+ 0.60	+ 1.10	+ 1.50	+ 1.80	+ 2.30	+ 3.60

b) Isotopes pairs

L'analyse de la répartition du taux de capture du gadolinium entre ses différents isotopes a déjà montré la nécessité de prendre en compte les isotopes pairs (essentiellement ^{156}Gd et ^{158}Gd) dans les calculs. Nous précisons cette contribution des isotopes pairs en présentant ci-dessous l'accroissement de l'effet en réactivité introduit par leur présence (calculs d'interprétation effectués avec et sans les isotopes pairs) :

Teneur en Gd_2O_3 (%)	1	2	4	8	12	16	22	40
Effet des isotopes pairs du Gd (%)	0.12	0.23	0.43	0.76	1.10	1.40	1.85	3.09

Ces résultats permettent de vérifier que la contribution des isotopes pairs, du fait d'une capture essentiellement épithermique, croît presque proportionnellement avec la charge en gadolinium.

Bien que faible (1.1 % pour une charge de 500 mg/cm3 de Gd_2O_3) et ne pouvant entraîner que des incertitudes minimes, cette contribution des isotopes pairs doit être représentée dans les calculs, pour la plage de teneur correspondant à l'utilisation du gadolinium comme poison consommable.

V.3.2.1.2.2 - Sensibilité à l'approximation multicellules utilisée

L'erreur introduite par le calcul du flux dans le niveau du taux de réaction d'un absorbant dépend d'une part de l'approximation multicellules adoptée et d'autre part de la noirceur de l'absorbant, donc ici de la charge en gadolinium.

L'étude comparative des différents modules multicellules a déjà été menée pour des teneurs voisines de 300 mg/cm3 dans le paragraphe IV où l'on a montré qu'à ces teneurs en Gd_2O_3 le calcul ROTH x 4 était équivalent à un calcul de référence. L'approximation ROTH est la plus grossière que l'on puisse réaliser dans APOLLO ; en conséquence, la comparaison ROTH/ROTH x 4 présentée ci-dessous est représentative de l'incertitude maximale (à 95 %) introduite par le flux sur le calcul de l'antiréactivité.

Teneur en Gd_2O_3 (%)	1	2	4	8	12	16	22	40
Ecart $\frac{ROTHx4 - ROTH}{ROTH}$ en %	1.6	1.9	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	4.0

Dans notre cas particulier, la stratégie de cellules tampons enrobantes permet d'améliorer les résultats du calcul ROTH et conduit à minimiser les écarts ROTH/ROTHx4 comme on peut le voir sur le tableau 29.

V.3.2.1 3 - Conclusions relatives à l'oscillation des échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (Série D)

La figure 32 résume les effets correspondants aux différentes sources d'incertitudes, présentés dans l'étude de sensibilité. On peut en déduire l'ordre de grandeur de l'intervalle de confiance (avec une chance de 68 %) associé à un calcul de l'antiréactivité : celui-ci est de l'ordre de ± 2 % pour les charges correspondant à l'utilisation du gadolinium comme poison consommable.

Du fait de la forte croissance de la capture résonante avec l'accroissement de la charge en Gd_2O_3, cette incertitude croît jusqu'à plus de 4 % pour le dernier échantillon à 40 % en Gd_2O_3 (échantillon D8). Cette campagne d'oscillation a levé cette forte incertitude car la forme de l'erreur obtenue ne présente pas de dérive avec l'augmentation de la teneur en Gd_2O_3 ; on peut donc conclure que le jeu actuellement recommandé pour les isotopes du gadolinium (notamment pour les isotopes impairs) a un niveau d'intégrale de résonance satisfaisant.

La figure 32 montre également que la forme des écarts expérience-calcul (efficacité calculée trop forte aux faibles empoisonnements) obtenue dans notre interprétation ne peut s'expliquer qu'à partir des sections thermiques des isotopes impairs : il faudrait accroître ces sections de l'ordre de 20 % pour éliminer la tendance. Cet ordre de grandeur est incompatible avec la marge d'incertitude de 5 % généralement admise pour les sections effectives thermiques. Par ailleurs, cette tendance est contredite expérimentalement par les résultats des interprétations de la campagne d'oscillations d'échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (1978) et de l'expérience CRISTO III (Cf. références /10/ et /38/). En fait, la connaissance des teneurs pour les faibles charges est incertaine : l'analyse chimique de l'échantillon à 1 % de Gd_2O_3 n'est pas en accord avec la mesure par transmission gamma, et la valeur de fabrication de 2.12 % pour l'échantillon D2 n'a pas été vérifiée par analyse.

En conséquence, nous pensons qu'il serait intéressant de lever la contradiction par une nouvelle expérience d'oscillations d'échantillons d'alumine gadoliniée qui aurait les caractéristiques suivantes :

- échantillons supplémentaires de faibles teneurs (et inférieures à 1 % de Gd_2O_3) dont on connaitrait avec précision la concentration en gadolinium ; il serait par ailleurs intéressant de disposer d'échantillons en ^{155}Gd et en ^{157}Gd afin de déterminer la contribution de chaque isotope à l'erreur et de préciser leurs sections respectives,

- tous les échantillons devront avoir le même diamètre et la même hauteur : celle-ci, supérieure ou de l'ordre de 10 cm, assurera une bonne précision aux mesures ainsi qu'une minimisation des effets de bout. Tous les échantillons devront avoir des containers de tailles rigoureusement identiques et ne contenant pas de corps absorbants tels que l'inox (le gainage zircaloy employé dans notre campagne conviendrait),

- des échantillons à différentes teneurs en bore (pyrex, poudre B_4C) devront être oscillés : ils permettront, d'une part de réduire fortement l'erreur de normalisation et d'autre part, par l'étude de l'erreur de flux dans un absorbant, de découpler les erreurs de flux des erreurs de sections efficaces dans le calcul du taux d'absorption d'un crayon gadolinié.

L'intérêt de ces expériences d'oscillations d'échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 chargés à des teneurs très différentes est de disposer d'échantillons présentant une forte sensibilité soit aux erreurs de sections thermiques soit aux sections épithermiques : ces échantillons permettent d'amplifier les phénomènes difficilement détectables expérimentalement (marges d'incertitude) pour les teneurs de projet. Nous proposons d'autre part d'accroître cette capacité de découplage et d'amplification en réalisant ces oscillations dans différents spectres, ce qui est facilement réalisable dans ce type d'expérience : le rapport de modération des cellules environnantes pourrait être modifié par l'utilisation de surgaines, l'oscillation pourrait être effectuée sous

cadmium, une configuration avec trous d'eau au voisinage de la cellule d'oscillation pourrait simuler les configurations d'utilisation du poison consommable actuellement envisagées.

En ce qui concerne le niveau d'écart expérience-calcul, l'interprétation de cette série permet d'obtenir des informations intéressantes ; on peut conclure que, dans la plage d'utilisation du gadolinium comme poison consommable (200 à 800 mg/cm3), le calcul APOLLO en option EURYDICE ROTHx4 surestime l'antiréactivité de 0.5 % ± 3.5 %.

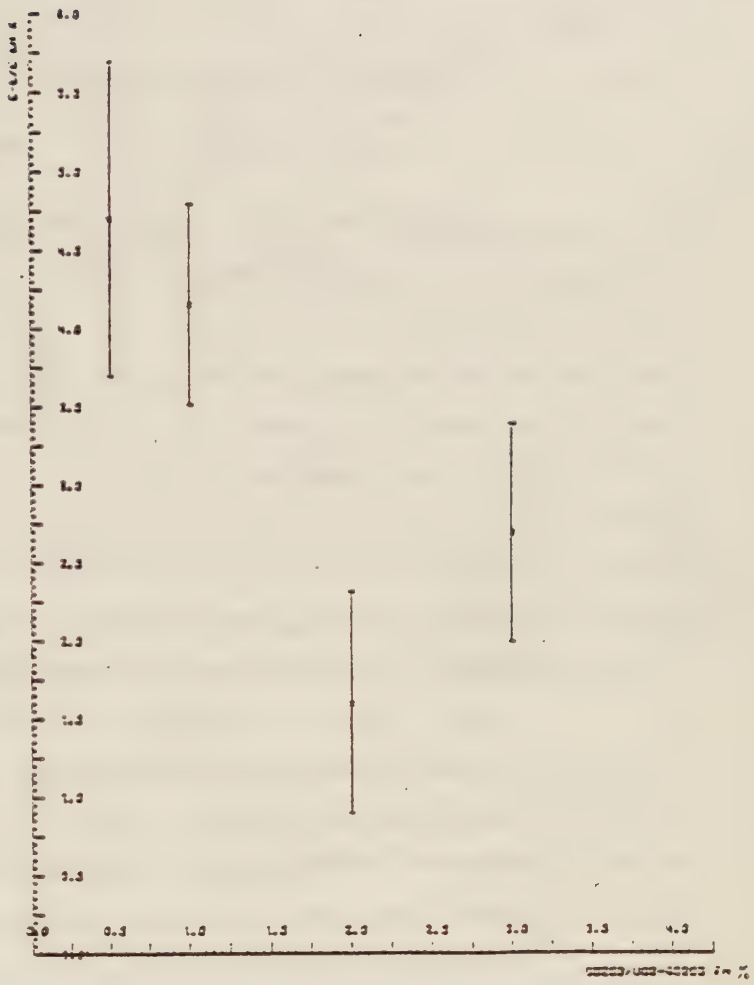
V.3.2.2 - Echantillons UO_2 - Gd_2O_3 (Série C)

Les signaux bruts n'ont subi qu'une correction d'effet de bout de 8.5 %. L'interprétation donne les résultats présentés dans le tableau 30. Nous constatons qu'une surestimation par le calcul de l'effet en réactivité apparaît ici nettement et est plus forte que pour les échantillons d'alumine gadoliniée ; ceci peut s'expliquer par la différence de niveau des erreurs systématiques : l'effet de bout n'est plus le même et la géométrie environnante (configuration R2) est modifiée ici par la présence de chambres à fission pour la mesure du signal local.

Cette surestimation, moyennée sur les 9 échantillons UO_2 - Gd_2O_3, représente + 3.4 % avec une dispersion de ± 1.5 %. Cet écart-type est à peine supérieur aux incertitudes (à 1 σ) liées aux erreurs aléatoires de mesures : cela signifie que les tendances que l'on cherche à mettre en évidence, en fonction de l'enrichissement en ^{235}U ou en fonction de la charge en gadolinium, sont incertaines et peuvent correspondre avec une probabilité non négligeable à des fluctuations statistiques.

Bien que l'enrichissement en ^{235}U du crayon joue peu sur l'antiréactivité introduite, notamment pour les forts empoisonnements, il semble cependant que l'écart expérience-calcul s'accroisse avec l'enrichissement. En ce qui concerne l'étude des effets liés à la charge en gadolinium, on peut en première approximation estimer que l'effet lié à l'enrichissement est faible et considérer les différents échantillons d'une même charge comme une mesure répétée de l'écart expérience-calcul associé à cette teneur en Gd.

Nous présentons les écarts obtenus en fonction de la teneur sur la figure ci-contre : la surestimation par le calcul semble plus importante aux faibles charges (50 et 100 mg/cm3 de Gd) ce qui conforte la tendance déjà observée dans cette campagne pour les échantillons Al_2O_3-Gd_2O_3 de charges équivalentes.



V.3.3 - Echantillons contenant du Gd_2O_3 en grains

V.3.3.1 - Echantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 (Série B)

La fabrication /37/ de ces pastilles (Ø 8.2 mm, H = 12 mm) a été réalisée parallèlement à celle des pastilles d'alumine gadoliniée cobroyée (série D). Cependant, contrairement à ces dernières, la teneur en Gd_2O_3 présente une forte dispersion autour de la valeur visée comme le montre ci-dessous les résultats d'analyses des pastilles après fabrication :

Echantillons de Al_2O_3 + Gd_2O_3	Teneur visée	Teneur analysée
En grains de 196 µm	2 % 4 % 8 %	1,4 - 2,7 3,2 - 4,7 7,8 - 8,7
En grains de 378 µm	2 % 4 % 8 %	1,8 - 2,1 3,1 - 4,8 4,5 - 7,8

Cette dispersion des teneurs en Gd_2O_3 pour des pastilles d'un même lot avait été confirmée par la campagne d'oscillation 1978 (/2/, /38/) : des oscillations d'échantillons (teneur 4 % en Gd_2O_3) constitués d'une seule pastille d'alumine gadolinié (Gd_2O_3 cobroyé), alors que les pastilles à grains de Gd_2O_3 d'un même lot donnaient des variations d'effet en réactivité importantes traduisant des fluctuations de teneur atteignant 30 % (valeur cohérente avec les fluctuations des pastilles chargées à 4 % en Gd_2O_3 mises en évidence par analyse et présentées ci-dessus). Ces fluctuations avaient empêché de conclure à partir de l'interprétation des mesures par oscillations des échantillons à 4 pastilles à grains /38/.

Ces difficultés nous ont conduits, dans cette campagne, à sélectionner, grâce à une technique de transmission gamma /39/ les pastilles présentant peu de fluctuations de teneur ; la teneur moyenne de chacune des 3 pastilles constituant l'échantillon est d'autre part déterminée grâce à cette technique et nous connaissons l'incertitude associée (figure 33). L'incertitude sur la taille des grains est déduite d'une micrographie des pastilles (figure 34).

L'effet de bout correspondant à ces échantillons à grains (H = 36 mm) est estimé à partir de la comparaison des signaux 1 et 4 pastilles d'un même lot dans la campagne 1978 /2/. L'effet de bout pris égal à 11 % pour les échantillons Al_2O_3 - Gd_2O_3 cobroyés, devient respectivement 8 % et 7 % pour les grains de 196 et 378 microns.

L'interprétation est là-aussi menée avec le multicellules EURYDICE option ROTHx4 ; le traitement de la double hétérogénéité est réalisé avec le module BIHET d'APOLLO conçu spécialement pour le calcul des grains.

La figure 35 présente les résultats de l'interprétation et la comparaison entre les effets en réactivité induits par les échantillons à Gd_2O_3 cobroyé et ceux à Gd_2O_3 en grains ; on vérifie que pour ces tailles de grain, grandes devant le libre parcours thermique des neutrons dans le Gd_2O_3, on n'observe plus le phénomène de saturation intervenant pour le Gd_2O_3 cobroyé au voisinage d'une teneur de 1 %. Le phénomène d'autoprotection des grains joue d'autant plus que la charge en Gd_2O_3 est faible : pour des teneurs de projet (> 200 mg/cm3) l'utilisation des grains ne permet plus d'atteindre qu'une diminution de 20 à 30 % de l'antiréactivité introduite par un crayon gadolinié (cobroyé).

La comparaison expérience-calcul pour les 6 échantillons de la série B est donnée dans le tableau 31. On constate une forte dispersion des écarts expérience-calcul due à l'inhomogénéité des pastilles de cette fabrication.

Il semble cependant qu'aux teneurs de projet le calcul surestime l'efficacité des crayons gadoliniés à grains.

V.3.3.2 - Echantillons UO_2 - Gd_2O_3 - (Série A)

Ces échantillons ont tous le même support UO_2 enrichi à 5.1 % en ^{235}U et la même charge en Gd_2O_3 (310 mg/cm3). Cette série a en effet pour but essentiel l'étude de la variation de l'autoprotection du gadolinium avec la taille des grains de poison.

La méthode de blocage du poison, utilisé ici /40/ lors de la granulation du mélange, assure que l'homogénéité de distribution des sphères dans les pastilles, et probablement de pastille à pastille, est très bonne (au moins jusqu'au diamètre de cible de 200 µm (figure 36)). Pour l'échantillon comportant les plus gros grains (Ø = 380 µm ; ce sont les mêmes pastilles que celles chargées dans CAP III), le principe du

dosage et du mélange unitaire par air pulsé des constituants de chaque pastille a été retenu pour la fabrication : le contrôle après fabrication a montré une dispersion des doses de Gd_2O_3 par pastilles de 8 %. Les histogrammes de répartition des diamètres des grains sont donnés sur la figure 37. Le tableau 32 montre les écarts expérience-calcul. Ces résultats semblent montrer que la surestimation de l'efficacité du poison par le calcul disparait pour les fortes autoprotections ($Ø_{grain}$ = 380 microns) ; cette tendance apparaissait déjà pour les échantillons de la série B (support Al_2O_3).

La figure 38 montre l'effet d'autoprotection des grains : cet effet varie linéairement avec la taille des grains et représente une diminution de l'effet en réactivité de près de 1 % par accroissement de 10 microns de la taille des grains.

V.3.3.3 - Conclusions sur la qualification expérimentale des poisons à grains

Dans la gamme des teneurs en Gd_2O_3 utilisées en projet, les interprétations des séries A et B montrent que le schéma de calcul APOLLO (EURYDICE en option ROTHx4) avec son module BIHET permet de calculer ce type de poison consommable avec une précision de ± 5 % ; cela est suffisant pour mener d'ores et déjà des calculs de dégrossissage et de projet.

Cependant, le niveau de qualification atteint est inférieur à celui du poison sous forme cobroyée. Il serait d'autre part sécurisant de vérifier que la dispersion des écarts expérience-calcul observée est liée à la dispersion des teneurs en Gd_2O_3 entre pastilles d'un même lot. En conséquence, une expérience complémentaire pourrait être réalisée ; elle aurait les mêmes caractéristiques que celle proposée pour le gadolinium cobroyé ; l'accroissement de hauteur des échantillons améliorerait d'autre part la statistique sur la taille des grains et la teneur en Gd_2O_3 par échantillon. (2 à 3 fois plus de pastilles par échantillon).

B) INTERPRETATION PRELIMINAIRE DES MESURES D'EFFICACITE DE GRAPPES DE CRAYONS UO_2 - Gd_2O_3

1) Rappel des résultats expérimentaux

On donne dans le tableau suivant l'efficacité totale des grappes obtenue expérimentalement :

GRAPPE	EFFICACITE TOTALE EN PCM (*)
UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300 mg/cm3)	- 1640 ± 50
UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 grains 380 µm (300 mg/cm3)	- 1280 ± 40
UO_2 (3.0 %) - Gd_2O_3 cobroyé (200 mg/cm3)	- 1650 ± 50

(*) Ces résultats ne sont pas directement comparables aux valeurs calculées car il est nécessaire de prendre en compte dans l'interprétation les modifications du chargement de la zone nourricière du réacteur qui entraîne des variations de l'importance de la zone centrale de mesures.

Ce tableau montre d'une part la variation de l'autoprotection suivant la taille des grains de gadolinium (le rapport des efficacités des 2 premières grappes du tableau est égale à 1.28) et d'autre part l'équivalence en réactivité des grappes UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300 mg/cm3) et UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3).

2) Comparaison expérience-calcul

Les mesures d'efficacité de grappes de crayons UO_2 - Gd_2O_3 sont actuellement en cours d'interprétation.

Des calculs multicellules préliminaires confirment cependant l'équivalence en réactivité constatée expérimentalement entre la grappe UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 (cobroyé 300 mg/cm3) et la grappe UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (cobroyé 200 mg/cm3).

Ces calculs préliminaires des grappes ont été effectués /36/, avec le module EURYDICE en option ROTHx4 et ont donné les résultats suivants :

G R A P P E	k_∞	keff	$M^2(cm^2)$
UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300 mg/cm3)	1.27859	1.01756	50.98
UO_2 (3.0 %) - Gd_2O_3 cobroyé (200 mg/cm3)	1.27894	1.01790	51.02

On remarque que dans les deux cas, on a des aires de migration presque identiques ce qui traduit le même niveau de fuites dans les deux calculs. On obtient des keff très voisins : l'écart [Δkeff] vaut 32 pcm.

L'explication de cette faible différence est due à une compensation quasi-parfaite entre l'augmentation des absorptions et l'augmentation des productions entre les deux cas comme le montre le tableau suivant où l'on donne ces deux paramètres pour le crayon UO_2 - Gd_2O_3 central (C), pour les 8 crayons UO_2 - Gd_2O_3 périphériques (P) et le réseau UO_2 (R).

G R A P P E	Position	Production	Absorption
UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300mg/cm3)	C	1.6155 E-3	7.0008 E-3
	P	1.3468 E-2	5.9231 E-2
	R	1.00248	0.72961
UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 cobroyé (200 mg/cm3)	C	1.1265 E-3	6.7029 E-3
	P	9.4031 E-3	5.6595 E-2
	R	1.00737	0.73259

L'interprétation définitive avec des calculs "coeurs", pour prendre en compte les modifications de chargement du coeur nourricier au cours des mesures, ne doit pas remettre en cause le bon accord expérience-calcul sur l'équivalence des réactivités des deux grappes.

En effet, dans les deux cas les chargements du coeur nourricier aux différentes étapes sont identiques ou très voisins (Cf. paragraphe III.2.2.2).

VI MESURES PAR OSCILLATIONS D'ECHANTILLONS SIMULANT DU COMBUSTIBLE UO_2 - Gd_2O_3 IRRADIE

1) But de l'expérience

Les différentes séries d'échantillons d'oscillations décrites au paragraphe III comportaient de l'oxyde de gadolinium vierge. La composition isotopique du gadolinium présent était donc la même quelque soit l'échantillon. Pour faire varier cette composition isotopique, on est contraint d'irradier le gadolinium. Malheureusement, cette opération demande souvent des délais très longs et n'est pas toujours réalisable. De plus, nous savons que, dans le cas de crayons UO_2 - Gd_2O_3 irradiés, le fort gradient de flux dans le crayon provoque une distribution spatiale hétérogène de la concentration en gadolinium. Un moyen simple pour simuler ce dernier phénomène est de réaliser des pastilles à structure hétérogène, c'est-à-dire constituées de deux ou plusieurs couronnes dont la teneur en Gd_2O_3 et l'enrichissement en ^{235}U (dans le cas de combustible UO_2 - Gd_2O_3) sont variables. Dans cet optique, un certain nombre de pastilles de ce type ont été fabriquées. Le premier travail a été de réaliser des échantillons représentatifs du combustible UO_2 - Gd_2O_3 irradié.

2) Détermination des échantillons d'oscillations

2.1) Détermination des groupements les plus représentatifs

Afin de déterminer les groupements "couronne extérieure-cylindre interne" les plus représentatifs de la répartition radiale du ^{235}U et du gadolinium dans des combustibles UO_2 - Gd_2O_3 irradiés, nous avons effectué un calcul d'évolution pour un assemblage de type PWR avec les caractéristiques suivantes :

- Enrichissement initial en ^{235}U des crayons UO_2 : 3 %
- Nombre de trous d'eau dans l'assemblage : 16
- Nombre de crayons UO_2 - Gd_2O_3 dans l'assemblage : 8

- Enrichissement initial en ^{235}U des crayons UO_2-Gd_2O_3 : 3 %
- Teneur en gadolinium des crayons UO_2 - Gd_2O_3 : 300 mg/cm3

La disposition des trous d'eau et des crayons UO_2 - Gd_2O_3 dans l'assemblage est indiquée à la figure 39.

Pour le calcul d'évolution, la pastille d'UO_2 - Gd_2O_3 a été divisée en 4 zones concentriques évoluant séparément afin de bien prendre en compte l'hétérogénéité spatiale dans l'usure du gadolinium. Les pas d'irradiation retenus sont ceux recommandés dans la référence /16/.

Nous montrons sur la figure 40, la variation du K_∞ de l'assemblage en fonction du taux de combustion.

Sur les figures 41, 42 et 43 sont présentées respectivement les variations en fonction du taux de combustion de l'enrichissement en ^{235}U et des teneurs en ^{155}Gd et ^{157}Gd, pour les 2 zones correspondant aux pastilles expérimentales.

Nous constatons que l'hétérogénéité porte essentiellement sur les isotopes impairs du gadolinium ; l'autoprotection créée par ces isotopes conduit en revanche à une faible dispersion de l'enrichissement en ^{235}U dans le crayon irradié.

On note sur ces figures que la moitié du ^{155}Gd a disparu dans la zone externe au bout de 2000 MWJ/t et dans la zone interne après 4000 MWJ/t. La disparition du ^{157}Gd est plus rapide et correspond pour une disparition moitié à 800 MWJ/t et 2400 MWJ/t respectivement pour les zones externe et interne.

A partir de cette étude nous déduisons les groupements les plus représentatifs de couronnes Ø 8.05 x 5.7 mm et de cylindres Ø 5.7 mm

2.2) Description des échantillons d'oscillations

A l'aide des résultats précédents et des pastilles dont nous disposions, nous avons constitué une nouvelle série d'échantillons appelée "série E".

Comme le montre la figure 44, ces échantillons ont la même géométrie que celle des échantillons des séries précédentes. La longueur totale est de 45.5 mm. Le gainage et les bouchons sont en zircaloy.

Quatre pastilles hétérogènes se trouvent à l'intérieur ; elles sont centrées à l'aide de cales en zircaloy.

Le tableau 33 donne les caractéristiques de ces échantillons. Les parties intérieure et extérieure pour chaque échantillon E3, E5 et E7 sont identiques. Ces échantillons ont un double rôle :

- ils représentent le "temps zéro" d'autres échantillons. Par exemple, les échantillons E1, E2, et E4 simulent l'irradiation de E3.

- ils nous permettront de faire un recalage avec la série C où la concentration en Gd_2O_3 est là aussi uniforme.

3) Résultats expérimentaux

Ces échantillons ont été oscillés dans la pile Minerve, dans la configuration R2, d'une manière identique à celle décrite en paragraphe III.2.2.1. Le tableau 34 regroupe les résultats expérimentaux. Les écarts sur les mesures brutes ont été calculés comme on l'a indiqué en paragraphe III.2.2.1.

4) Interprétation des mesures et comparaison expérience-calcul

L'échantillon C8 reste l'échantillon référence. Comme ces échantillons ont la même géométrie que celle des échantillons homogènes de la série C, ils auront donc le même effet de bout (+ 8.5 %) et seront ramenés comme précédemment à l'échantillon référence C8.

La comparaison expérience-calcul apparaît dans le tableau 34 et suggère les remarques suivantes :

- les écarts obtenus varient de + 2.7 % à + 5.6 %. Ils sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les autres séries UO_2 - Gd_2O_3 et semblent confirmer la surestimation par le calcul de l'efficacité de poisons faiblement chargés (< 100 mg/cm3 de Gd_2O_3),

- la méthode de calcul employée prend bien en compte la présence de deux zones contiguës qui ont des teneurs en Gd_2O_3 et des enrichissements en ^{235}U différents,

- la cohérence avec la série C est vérifiée avec les échantillons E3, E5 et E7, comme le montre le tableau 35,

- la zone périphérique joue un rôle prépondérant dans l'absorption des échantillons comme on le voit sur le tableau 36. L'absorption dans la zone externe représente entre 65 % et 78 % de l'absorption totale du crayon tandis que celle de la zone interne oscille entre 35 % et 22 %,

- trois échantillons seulement ont une teneur en Gd différente par couronne. D'autre part, ces échantillons minimisent l'hétérogénéité réelle apparaissant en évolution pour des crayons chargés à plus de 300 mg/cm3. (Un échantillon chargé à 2 % en zone interne et 0 % ou 0.5 % en couronne périphérique aurait une plus grande valeur de test).

5) Conclusion

En conséquence, bien que cette série assure qu'il n'y ait pas de problème majeur lié à l'hétérogénéité du Gd dans le crayon, cette série donne essentiellement une information sur les crayons empoisonnés à faible teneur. La surestimation moyenne, par le calcul, de l'effet en réactivité est de 4.2 % avec une dispersion de ± 0.9 %, dispersion cohérente avec l'écart-type de 1.3 % associé aux erreurs de mesures ; cet écart expérience-calcul est également cohérent avec celui obtenu pour les échantillons homogènes et confirme la tendance à la surestimation par le calcul de l'efficacité de crayons UO_2 - Gd_2O_3 faiblement chargés (moins de 100 mg/cm3 de Gd).

VII ETUDE DU GADOLINIUM EN EVOLUTION

1) Exposé de la situation

L'utilisation du gadolinium comme poison consommable dans les réacteurs à eau sous pression nécessite des programmes expérimentaux qui devront donner des informations pour optimiser le chargement d'assemblages empoisonnés dans les réacteurs de puissance. On ne dispose en effet que de quelques résultats obtenus dans des conditions neutroniques "propres" et il est nécessaire de qualifier les calculs concernant les points suivants :

- efficacité du poison en fonction du taux de combustion,
- structure fine du flux dans la partie de l'assemblage qui entoure la cellule gadoliniée,
- efficacité des grappes de contrôle dans les assemblages empoisonnés.

A l'heure actuelle, quelques expériences d'irradiation de crayons ou de plaques combustibles empoisonnés au gadolinium ont été réalisées. Cependant, ces irradiations ont été conçues pour des programmes à caractère technologique et ne permettent pas d'interprétation neutronique correcte. Citons :

- irradiation dans les réflecteurs à pilotage à puissance constante (gradient de flux, position variable au cours du temps),

- irradiation de capsules dans des canaux internes de réacteurs expérimentaux (spectre non représentatif, présence de matériaux de structure),

- irradiation de crayons dans des assemblages spéciaux (hétérogénéités supplémentaires, mise en oeuvre de calculs de réacteurs pas suffisamment précis).

Il n'a pas été possible de tirer des informations de ces expériences pour la qualification des codes neutroniques. Notons toutefois que les résultats acquis avec l'expérience CAP-1800-I laissent supposer qu'APOLLO ne doit pas donner pour le gadolinium sous forme cobroyée des résultats entachés d'erreurs importantes.

Il apparaît alors comme nécessaire de réaliser une expérience qualifiée d'analytique, c'est-à-dire qui mette en évidence les différents facteurs fondamentaux qui interviennent dans ce problème : les données nucléaires de base et le modèle de calculs utilisé pour l'évolution. D'où la naissance du projet "GEDEON".

L'idée de base qui a présidé au choix d'une expérience telle que GEDEON est de pouvoir disposer de crayons irradiés dans des conditions les plus représentatives possibles d'un PWR tout en pouvant suivre pas à pas l'évolution du gadolinium et du combustible ainsi que la distribution de puissance au voisinage des poisons. MELUSINE offrait une puissance de 8 MW qui autorise à irradier un assemblage de type PWR sans avoir à le refroidir par un circuit sous pression particulier. Cette possibilité d'échapper à un système de boucle compliqué et coûteux a été poussée au maximum et conduit à des irradiations de l'ordre de 700 MWj/t par cycle d'un mois environ.

Le but du travail effectué dans cette thèse était de vérifier la faisabilité neutronique de l'expérience de façon à s'assurer de la bonne représentativité de l'expérience (spectre proche de celui des PWR, absence de perturbation trop importante ...) et de proposer un programme permettant de mettre en évidence les éventuelles erreurs liées aux calculs (sections efficaces et schéma de calcul).

2) Présentation de l'expérience "GEDEON"

2.1) Etude de faisabilité neutronique

L'irradiation GEDEON est destinée à qualifier les calculs d'évolution du gadolinium dans des réseaux de type 17 x 17.

Le dispositif est constitué par un réseau de 13 sur 13 crayons prenant la place de 4 assemblages au centre du coeur de MELUSINE.

Dans ce dispositif il est prévu d'irradier simultanément plusieurs crayons contenant du gadolinium.

Pour que les résultats obtenus dans l'expérience soient représentatifs du but fixé, il faut que ces résultats puissent être transposables à un réseau de type 17 x 17 à chaud sans risque d'introduire d'erreur importante.

Il est donc nécessaire, au niveau de l'étude de faisabilité de vérifier :

- que le réseau GEDEON, qui est modéré par de l'eau à 60°C (d ~ 1) est représentatif d'un réseau PWR 17 x 17 à chaud,

- que les crayons sont irradiés dans une zone où le spectre est à l'équilibre,

- que les crayons contenant du gadolinium n'introduisent pas de perturbation de spectre entre eux.

Ce chapitre est destiné à répondre à ces différents points.

2.1.1 - Représentativité de l'expérience GEDEON par rapport à un réacteur de puissance : comparaison du réseau GEDEON et d'un réseau 17 x 17

Les caractéristiques des cellules du réseau GEDEON ont été choisies de manière à conserver un même rapport de modération (nombre d'atomes d'eau sur nombre d'atomes combustibles) avec la cellule d'un réseau 17 x 17.

Dans le tableau 37 nous donnons les caractéristiques géométriques des deux types de cellules.

Dans le tableau 38 nous indiquons les spectres moyens des deux cellules (à 4 groupes). Le découpage des groupes est indiqué dans le tableau 2. Nous avons aussi donné les valeurs obtenues en changeant uniquement la température du modérateur. Dans le tableau 39, nous donnons quelques sections efficaces moyennes dans les macrogroupes 3 et 4 (épithermique et thermique).

Les spectres entre le réseau GEDEON et le réseau PWR 17 x 17 sont très proches. L'écart provient principalement de l'effet de température du modérateur. C'est principalement cet effet qui devra être pris en compte par le calcul pour transposer les résultats de GEDEON à un réseau PWR à chaud.

2.1.2 - Choix d'un assemblage 13 x 13 : influence du coeur nourricier

Plusieurs problèmes se posaient pour définir la dimension du réseau de GEDEON.

Le premier est d'ordre technologique : il est évident que le dispositif doit occuper l'emplacement d'un ou de plusieurs éléments combustibles de MELUSINE.

Le second est d'ordre neutronique : la zone doit être suffisante pour irradier les crayons gadoliniés dans un spectre à l'équilibre.

Les renseignements tirés de l'expérience SHERWOOD /41/ où des pastilles d'UO_2 dopées étaient irradiées au centre d'un réseau de 5 x 5, ont montré que l'emplacement d'un élément combustible était insuffisant pour le problème cité précédemment.

Nous nous sommes orientés vers un dispositif plus important prenant la place de 4 éléments MELUSINE. Compte tenu du pas du réseau retenu, ceci nous a conduits à un réseau de 13 x 13 crayons.

Afin de vérifier si on obtenait une zone d'équilibre suffisante, nous avons effectué des calculs avec APOLLO multicellules. Les calculs ont été réalisés pour un quart du dispositif en prenant dans celui-ci un réseau UO_2 sans perturbation (pas de présence de crayons gadoliniés).

Le découpage adopté pour les calculs et le repérage des cellules sont indiqués sur les figures 45a et 45b.

Du centre à la périphérie, on remarque :

- le motif 13 x 13 où nous avons discerné neuf types de cellules. Les cellules tampons 2, 6, 7 sont destinées à prendre en compte les interactions entre deux crayons gadoliniés voisins. Les cellules 8 et 9 vont nous permettre de mettre en évidence l'adaptation du spectre dans le massif UO_2,

- la zone nourricière, découpée en 3 zones de burn-up de manière à réaliser des variations de taux de combustion des éléments nourriciers.
  Ces éléments se présentent sous la forme de plaques d'alliage uranium-aluminium fortement enrichies en ^{235}U et gainées avec de l'aluminium. Elles sont disposées à l'intérieur de boitiers contenant 23 plaques. Dans nos calculs, la zone nourricière a été réalisée en deux étapes avec l'option HOMOGE du code APOLLO :

  - homogénéisation de la cellule U-Aℓ (voir figure 46),
  - homogénéisation du faisceau de 23 plaques (voir figure 46).

- le réflecteur comportant 3 zones qui permettent d'avoir un spectre et une forme de flux réalistes.

Ces calculs ont été effectués pour 3 taux de combustion différents pour les éléments du coeur de MELUSINE (respectivement 10.2 %, 31 % et 44 %).

Les résultats présentés dans le tableau 40 montrent que deux cellules tampons (cellules 8 et 9) suffisent pour assurer l'équilibre.

On dispose donc d'une zone de 9 x 9 cellules dans laquelle le spectre est très proche de l'équilibre.

2.1.3 - Etude des conditions pour qu'il n'y ait pas d'interaction entre les crayons gadoliniés

Pour des raisons de temps et de coût, il est souhaitable de pouvoir irradier plusieurs crayons contenant du gadolinium en même temps. Ces crayons pourront être différents (teneur en gadolinium ou usure) et être chargés au cours de l'irradiation. Il est donc nécessaire de s'assurer qu'il n'y a pas d'interaction de spectre entre ces crayons.

Une étude de la propagation des effets de spectre induits par un crayon contenant 8 % de gadolinium a été réalisée. Les résultats sont donnés dans le tableau 41.

Au-delà de deux cellules la perturbation est très faible. Dans ces conditions, en séparant les crayons UO_2-Gd_2O_3 par 5 cellules on a une séparation des interactions. Il est donc possible d'irradier en même temps 4 crayons d'UO_2 - Gd_2O_3 suivant le schéma proposé sur la figure 47. Par contre, augmenter le nombre de crayons ne permettrait plus de découpler totalement les effets.

Nous avons repris les calculs de l'assemblage en prenant un taux de combustion moyen (3 zones ayant des taux de combustion différents : 10,2 % - 31,0 % - 44,0 %), dans le cas d'un réseau régulier sans perturbation et dans le cas d'un réseau avec crayons UO_2 - Gd_2O_3.

Les résultats sont donnés dans le tableau 42.

Ces résultats confirment bien que dans les cellules "7", c'est-à-dire en particulier dans le crayon au centre du dispositif, on a le spectre asymptotique du réseau.

2.2 - Etude d'optimisation de l'expérience : définition des teneurs en gadolinium et du planning de déchargement des crayons gadoliniés

Nous venons de voir que le dispositif expérimental permettait de faire évoluer quatre crayons gadoliniés sans interaction avec la zone nourricière ni entre eux. Il nous faut maintenant étudier les paramètres importants de l'expérience, à savoir :

- l'enrichissement en ^{235}U et la teneur en Gd_2O_3 des différents crayons gadoliniés,

- le planning de déchargement des crayons UO_2 - Gd_2O_3 et leur remplacement.

Cette étude nécessite un calcul d'évolution, aussi notre premier travail a été de déterminer une géométrie de calcul adaptée à notre cas.

2.2.1 - Géométrie de calcul

Vu l'étendue importante du coeur de Mélusine et les coûts importants que nécessiteraient les calculs de transport correspondants, nous avons cherché une solution plus avantageuse (mais donnant des résultats corrects) pour faire le calcul d'évolution du massif 13 x 13.

Nous disposions de résultats de calculs de diffusion du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble /42/. Ces calculs donnent les puissances dégagées dans les crayons constituant le dispositif GEDEON. La figure 48 donne la carte de puissance dans une configuration voisine de celle qui sera utilisée lors de l'expérience. On note que l'écart de puissance dégagée entre la face avant et la face arrière est de 14 %. L'écart entre les faces droite et gauche est de 4 %. Le crayon le plus chaud se situe sur la face avant du dispositif et l'écart entre ce crayon et le crayon dégageant le moins de puissance est de 37 %.

Cependant, la zone 9 x 9 que nous avions déjà annoncée au paragraphe précédent comme zone d'équilibre, ne présente pas de grandes variations de puissance. La forme macroscopique du flux dans l'assemblage 13 x 13 est donc relativement plate mise à part à sa périphérie. L'influence du coeur nourricier sur la forme du flux dans la zone expérimentale étant faible, on peut alors limiter nos calculs d'évolution au calcul du massif 13 x 13 avec condition de réflexion à la périphérie et associer l'usure du gadolinium au taux de combustion de l'assemblage. De plus, comme les positions des crayons gadoliniés ont été choisies de manière à rendre leurs évolutions indépendantes, il nous suffit alors de ne traiter qu'un quart d'assemblage (Cf. figure 49).

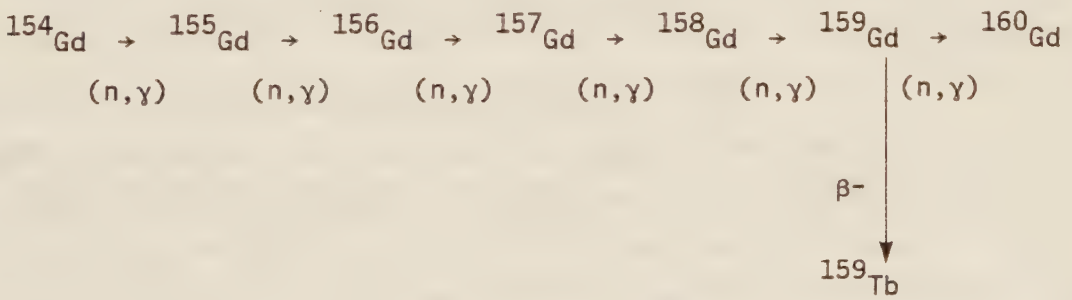
2.2.2 - Etude de sensibilité

L'étude du gadolinium au cours de cette expérience comprend la détermination par analyse du taux d'irradiation, de la consommation du gadolinium et de l'effet sur la concentration des autres nucléides (U, Pu ...). Le choix des taux de combustion de déchargement des crayons UO_2-Gd_2O_3 devra donc permettre d'obtenir les bonnes informations au bon moment (c'est-à-dire au bon taux de combustion). Pour le gadolinium, nous savons que ses deux isotopes impairs ont des vitesses de disparition différentes et que l'usure du poison est plus forte à la surface du crayon gadolinié qu'en son centre. Les phénomènes liés à l'évolution du gadolinium seront donc localisés dans le temps (taux de combustion) et dans l'espace (en faisant des analyses par couronne).

Ces phénomènes sont représentatifs :

- des sections efficaces des isotopes du Gd,
- du niveau de flux.

Nous allons faire une étude de sensibilité sur ces deux paramètres afin de mettre en évidence les aspects physiques importants et de proposer un programme de mesures cohérent. La base de cette étude est l'évolution d'un crayon UO_2 - Gd_2O_3, dont l'enrichissement en ^{235}U est de 3.25 %, dans le motif multicellules décrit au paragraphe VII 221 (Cf. figure 49) ; dans un premier temps la teneur en Gd_2O_3 est fixée à 3 %. Nous avons fait évoluer le gadolinium dans la chaine suivante :



Il a été montré /43/ qu'il n'est pas nécessaire d'introduire dans notre chaîne des isotopes dont le nombre de masse est supérieur à 160. Par contre, et nous le verrons plus loin, on doit tenir compte du ^{154}Gd (non disponible actuellement sur la bibliothèque APOLLIB), qui donne par filiation du ^{155}Gd. Les calculs ont été effectués en prenant 4 couronnes équivolumiques dans le crayon gadolinié.

a) Sensibilité aux sections efficaces

On a modifié de 5 % les sections efficaces d'absorption du ^{155}Gd et du ^{157}Gd. Les figures 50 et 51 présentent les résultats obtenus. L'erreur introduite sur les sections apparaît tout d'abord sur la couronne périphérique du crayon gadolinié. Elle est très différente de celle obtenue sur la couronne interne ou sur la moyenne sur le crayon : pour le ^{155}Gd, on a une erreur maximale de + 19.7 % à 5000 MWj/t, et pour le ^{157}Gd, l'erreur maximale est de 18.2 % à 2250 MWj/t. L'erreur est moins forte pour la couronne interne et pour la moyenne sur le crayon : elle vaut respectivement 16.7 % et 17.3 % pour le 155 Gd et seulement 9 % et 9.3 % pour le ^{157}Gd. Ces deux dernières erreurs apparaissent à des taux de combustion extrêmement voisins. Notons que si l'on ne prenait pas en compte l'isotope ^{154}Gd dans la chaîne d'évolution, l'erreur sur le ^{155}Gd ne cesserait de croître, comme le montre la figure 50.

Pour des taux de combustion élevés (10000 MWj/t), du fait de la mise à l'équilibre des isotopes, l'erreur redevient égale à l'erreur initiale introduite sur les sections.

On voit donc qu'on peut réaliser une amplification d'un facteur 4 des erreurs liées aux sections efficaces des isotopes ^{155}Gd et ^{157}Gd par des analyses destructives menées à des taux de combustion et des zones spatiales bien déterminés.

b) Sensibilité à l'erreur de flux

Une erreur de flux, représentative de l'erreur potentielle, a été réalisée en comparant les calculs d'évolution en option ROTH à ceux utilisant l'option ROTHx4. La figure 52 montre l'effet du flux sur le rapport $\frac{N5}{N8}$ du crayon UO_2 - Gd_2O_3. Sur les figures 53 et 54, on remarque que cette erreur conduit à des valeurs de l'ordre de ± 30 % pour les concentrations de ^{155}Gd et de ^{157}Gd sur la couronne interne et sur la moyenne sur le crayon ; pour la couronne périphérique, l'erreur maximale est plus faible et de l'ordre de 20 %. Quand les isotopes 155 et 157 du gadolinium atteignent l'équilibre, l'erreur s'annule. L'extrêmum des

courbes correspond au compromis entre la croissance de l'erreur (linéaire quand l'absorbant n'est plus autoprotégé) et sa tendance à s'annuler dès que l'on approche, aux faibles concentrations de l'isotope, de sa mise à l'équilibre.

En conséquence, l'erreur liée au niveau de flux s'amplifie pour des taux de combustion où l'erreur liée aux sections efficaces est elle aussi maximale. Toutefois, on n'a pas la correspondance spatiale pour les deux types d'erreurs : pour les sections efficaces on s'intéresse à la zone périphérique, pour le niveau de flux, la zone interne et la moyenne sur le crayon sont significatives. La coïncidence sur les taux de combustion est pénalisante et nous allons maintenant montrer qu'il est possible de découpler les deux types d'erreurs décrits plus haut.

c) Découplage des deux types d'erreurs

Pour découpler les deux types d'erreurs, nous disposons de deux techniques :

1) Découplage spatial

Comme nous l'avons déjà remarqué plus haut, les deux types d'erreurs n'apparaissent pas avec la même intensité dans les différentes zones spatiales. L'erreur sur les sections est prépondérante sur la couronne périphérique, pour des taux de combustion de l'ordre de 2500 MWj/t pour ^{157}Gd à titre d'exemple, alors que l'analyse moyenne sur le crayon traduit essentiellement l'erreur sur le flux, pour un taux de combustion voisin de 5000 MWj/t pour le ^{157}Gd.

2) Recalage des analyses sur le rapport $\frac{N5}{N8}$ du crayon UO_2 - Gd_2O_3

Le deuxième moyen dont on dispose pour dissocier les deux types d'erreurs est de ramener les résultats obtenus au rapport $\frac{N5}{N8}$ "local" (rapport isotopique dans le crayon gadolinié lui-même) : ceci permet de s'affranchir en partie de l'erreur sur le flux, et ce d'autant plus que l'erreur de spectre est faible ; ceci est le

cas des erreurs multicellules qui engendrent surtout des erreurs sur le niveau de flux dans l'absorbant. La figure 55 montre que l'erreur maximale liée au flux est réduite de 60 % si l'on emploie cette stratégie ; l'effet est encore plus fort sur la couronne périphérique qui nous intéresse pour la mise en évidence des erreurs de sections, où l'on a un facteur voisin de 3.

2.2.3 - Variation de la sensibilité avec la teneur en Gd_2O_3

Il est intéressant d'étudier la variation d'amplification des erreurs avec la charge en gadolinium. Nous avons comparé les résultats pour les trois teneurs suivantes : 0.5 % - 3 % - 8 %, couvrant toute la gamme de projet. On donne sur les figures 51, 56 et 57 les résultats obtenus avec ces trois teneurs pour l'effet lié à la section du ^{157}Gd. Les inconvénients liés à l'utilisation de fortes charges en gadolinium sont les suivants :

- plus la charge en Gd augmente, plus l'autoprotection spatiale augmente. Par conséquent, les erreurs de sections n'apparaissent que sur la couronne périphérique. Il devient impossible d'avoir une amplification significative pour la couronne interne même en fin d'évolution,

- sur la couronne externe, l'erreur maximale est moins forte comme le montre le tableau ci-dessous :

Charges en Gd	Taux de combustion (MWj/t) auquel l'erreur est maximale	$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)$ Gd157 (%)
8 %	3000	13,8
3 %	2000	19,0
0,5 %	1000	21,0

Ceci impose donc une analyse par couronne car l'amplification de l'erreur initiale sur les sections est moindre que pour les faibles charges :

- le tableau ci-dessus montre également qu'il faut atteindre des taux de combustion élevés pour mettre en évidence des erreurs sur les sections (surtout pour le ^{155}Gd). On serait donc conduit à réaliser de forts taux de combustion, ce qui pénaliserait les autres études à faibles teneurs. (Une charge initiale de 8 % nécessiterait des taux de combustion supérieurs à 10000 MWj/t),

- la forme spatiale de la concentration en gadolinium dans le crayon est plus pentue à forte charge (Cf. figures 58 et 59) ce qui nécessite, pour l'analyse par couronne, une technique sophistiquée (voir paragraphe suivant).

L'utilisation de fortes charges présente les avantages suivants :

- le pic de l'erreur maximale est moins haut mais plus large, ce qui autorise des légères variations de taux de combustion pour le déchargement du crayon gadolinié,
- l'erreur potentielle liée au flux devient plus forte et est donc plus facilement décelable.

Ces différentes considérations nous conduisent à penser qu'il est nécessaire, dans l'expérience GEDEON, de varier la charge en gadolinium des différents crayons ; des crayons de teneur faible et inférieure à celle utilisée en projet doivent être irradiés car ils présentent une remarquable sensibilité aux erreurs de sections.

VII.2.3 - Proposition de programme pour une étude sur le gadolinium cobroyé

2.3.1 Grille expérimentale

L'étude de sensibilité précédente, ainsi que la contrainte du respect de la symétrie 1/8ème (même antiréactivité par quart d'assemblage) permet de concevoir une grille expérimentale qui est la suivante :

Taux de combustion (MWj/t)	Quadrant 1	Quadrant 2	Quadrant 3	Quadrant 4
0	5 %	5 %	5 % *	5 % (a)
2800		(b)	(a)	2 %
4600	(c)		2 % (b)	(b) + (c)
6500		* 0,2 % (c)	0,4 % * (a)+(b)	0,6 % * (a)
8000				

Nous n'avons considéré que le cas du gadolinium cobroyé, cependant des crayons avec du gadolinium en grains peuvent être envisagés (ce sont les emplacements notés *) ; par exemple, au dernier rechargement, on pourrait mettre 3 crayons UO_2 - Gd_2O_3 chargés à 0.5 % en Gd_2O_3 avec des tailles de grains de 100, 200 et 400 microns.

Les phénomènes physiques notés (a), (b), (c) et que l'on cherche à mettre en évidence sont les suivants :

N O T A T I O N	Phénomène physique
(a)	erreur ($\Delta\sigma/\sigma$) GD 157
(b)	erreur ($\Delta\sigma/\sigma$) GD 155
(c)	($\Delta\Phi/\Phi$) par analyse du ^{157}Gd

L'échantillon chargé à 5 % en Gd_2O_3 subira la plus longue irradiation (8000 MWj/t). Pour cette teneur, on aura des points à 4 taux de combustion (2800, 4600, 6500 et 8000 MWj/t) ce qui permet d'avoir une courbe d'évolution complète comme on peut le voir sur la figure 60. La figure 61 visualise la variation du taux d'absorption du gadolinium pour différentes charges initiales ; l'évolution complète des crayons à 5 % de Gd_2O_3 donnera également d'importantes informations sur les taux de réaction du gadolinium. Pour cette teneur, les 3 phénomènes (a), (b) et (c) seront observés ; de même pour la teneur de 2 % où les phénomènes apparaissent plus rapidement du fait d'une charge en Gd_2O_3 plus faible. A 6500 MWj/t, le chargement de crayons faiblement chargés (0,2 - 0,6 %) permet de déterminer avec précision les erreurs de sections.

2.2.3 Programme de mesures

Le programme de mesures associé à l'expérience GEDEON se décompose en deux parties :

- mesures de distribution de puissance sur les crayons UO_2 - Gd_2O_3 et UO_2,
- mesures de la disparition du gadolinium.

Le premier type de mesures est non destructif. Le second est destructif sauf dans le cas de mesures qualitatives.

1) Mesures de distribution de puissance sur les crayons UO_2 - Gd_2O_3 et UO_2

Le déchargement des crayons gadoliniés est effectué conformément au programme fixé précédemment. Avec chaque crayon d'UO_2 - Gd_2O_3 déchargé, on enlève également un crayon d'UO_2 pur qui fournit une référence pour caractériser l'irradiation de l'assemblage.

Chaque crayon est mesuré systématiquement sur le banc de gammamétrie pour deux objectifs. La distribution fine de l'activité totale des produits de fission donne des informations sur la bonne tenue des pastilles de la colonne fissile. Cette vérification est particulière-

ment utile pour le combustible UO_2 - Gd_2O_3 car elle mettrait en évidence la présence d'une pastille de composition initiale différente (enrichissement ou teneur en gadolinium) qui n'aurait pas été détectée au cours des opérations de contrôle de fabrication.

L'intégration du spectre gamma sur une longueur fissile correspondant à une ou deux pastilles permet d'avoir, en valeur relative ou éventuellement absolue, la concentration locale en émetteurs gamma à vie courte et à vie longue. On en déduit la distribution axiale de la puissance finale et du taux de combustion.

2) Mesures de la disparition du gadolinium

2.1 Mesures qualitatives

La neutronographie est une technique non destructive fréquemment mentionnée pour l'étude de l'usure du gadolinium. Dans l'état actuel des études visant à quantifier les clichés photographiques, la précision atteinte n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins neutroniques. Par contre, la neutronographie est un excellent moyen de visualisation de l'usure radiale du gadolinium. Or, les études théoriques ont mis en évidence l'intérêt de l'étude des crayons en zone concentrique. La neutronographie pourrait constituer un moyen pour vérifier, avant l'usinage, que les cotes des couronnes définies par des calculs prévisionnels sont optimales.

La mesure de la position des émetteurs gamma dans le crayon par gammamétrie tomographique est une technique non destructive développée récemment dans plusieurs laboratoires du CEA. L'information obtenue est la distribution finale des fissions dont le nombre augmente localement avec la disparition des atomes absorbants de gadolinium. Plus précise quantitativement que la neutronographie mais moins performante que les analyses destructives, elle peut jouer un rôle intéressant pour bien suivre l'usure radiale du gadolinium. Il serait utile de mettre en oeuvre cette technique à la hauteur des échantillons découpés en zones concentriques dans les premiers crayons déchargés.

2.2 Mesures quantitatives

Les mesures sont destructives et la préparation des échantillons d'analyse est la suivante :

Le nombre d'échantillons analysés dans un crayon d'UO_2 - Gd_2O_3 ou d'UO_2 est de 2 ou 3 :

- 1 échantillon prélevé au flux maximum,
- 1 échantillon prélevé à 150 mm en dessous, correspondant à un flux égal à 85 % du premier,
- éventuellement, dans le cas du combustible gadolinié seulement, un échantillon contigu à l'un des deux premiers et destiné à être usiné en couronnes concentriques.

On disposera ainsi au moins de deux points de mesure par crayon. Si les deux résultats conduisent à des conclusions non concordantes, un troisième échantillon prélevé systématiquement à côté du premier est alors analysé afin de lever les doutes d'origine expérimentale.

En principe, on ne conserve par la partie haute des crayons plus sensible au mouvement des barres de contrôle. Des tronçons de longueur voisine de 5 cm sont prélevés au moment du découpage du crayon et stockés en vue d'une éventuelle campagne de mesure de la capture résiduelle par la méthode d'oscillation.

L'échantillon à analyser correspond à une tranche de combustible (avec sa gaine), de longueur voisine de celle d'une ou deux pastilles. Il est caractéristique d'une zone axiale précise du crayon mais sa taille est suffisante pour moyenner les phénomènes locaux (répartition radiale en particulier). Le plan de découpage des crayons est confronté aux résultats des mesures non destructives. Un grand soin est apporté pour éviter la pollution par du combustible d'une autre provenance.

Dans certains échantillons, il est demandé de prélever plusieurs couronnes de combustible. La technique couramment utilisée consiste à percer, après imprégnation avec de l'araldite, des trous axiaux. Compte tenu de l'importance apportée à l'étude radiale de la composition isotopique du gadolinium, on va rechercher un processus expérimental pour augmenter la précision avec laquelle est connu le diamètre effectif du trou réalisé. D'autres techniques de substitution peuvent être envisagées (micro-prélèvements sur une couronne ...). A tout échantillon analysé par couronnes, doit être associé un échantillon contigu analysé globalement pour obtenir un résultat de confirmation.

Après usinage, les échantillons sont dissous soigneusement et des aliquotes de solutions, parfaitement représentatives de la zone étudiée mais de radioactivité modérée, sont transmises à un laboratoire d'analyse spécialisé dans les mesures de grande précision.

La spectrométrie de masse permet d'obtenir avec une très grande précision la composition isotopique des éléments chimiques contenus dans le combustible : uranium, plutonium, gadolinium, néodyme ... La mesure du rapport de concentrations en éléments différents est obtenue après mélange d'un traceur (double dilution isotopique). Ces techniques d'analyses sont utilisées couramment au CEA dans le cadre des études neutroniques sur les combustibles irradiés.

Les rapports atomiques mesurés sont systématiquement donnés pour l'uranium :

$$\frac{^{234}U}{^{238}U}, \frac{^{235}U}{^{238}U}, \frac{^{236}U}{^{238}U}$$

et éventuellement, pour le plutonium :

$$\frac{^{239}Pu}{^{238}U}, \frac{^{240}Pu}{^{239}Pu}, \frac{^{241}Pu}{^{239}Pu}, \frac{^{242}Pu}{^{239}Pu}$$

Pour les échantillons avec gadolinium, on mesure les rapports :

$$\frac{152Gd}{160Gd}, \frac{154Gd}{160Gd}, \frac{155Gd}{160Gd}, \frac{156Gd}{160Gd}, \frac{157Gd}{160Gd}, \frac{158Gd}{160Gd}$$

Un soin particulier doit être apporté pour mesurer avec précision ces rapports dans les échantillons les plus irradiés. Les quantités de 155Gd et 157Gd en équilibre final permettent de déterminer respectivement les sections efficaces des isotopes pairs 154Gd et 156Gd. La variation du nombre total d'atomes (154Gd + 155Gd + 156Gd + 157Gd + 158Gd) donne du 160Gd. On admet que la faible section efficace du 160Gd est bien calculée. A défaut on peut envisager de faire mesurer par spectrométrie de masse le rapport 161Gd/160Gd.

La teneur en gadolinium (rapport 160Gd/238U) n'est mesurée que sur une pastille non irradiée de chaque lot. On admet que les garanties d'homogénéité des pastilles fournies par le fabricant sont suffisantes par rapport aux exigences des spécifications établies par ceux qui assureront l'interprétation des mesures. L'identité des pastilles sera vérifiée expérimentalement si une technique non destructive de précision suffisante est mise au point dans des délais convenables.

La mesure des teneurs en 238Pu, américium et curium n'apparaît pas utile dans l'étude du gadolinium.

Outre les nucléides mentionnés plus haut, on peut étudier les isotopes du néodyme. Le 148 Nd est un indicateur du nombre de fissions. Pour obtenir par double dilution isotopique le rapport 148Nd/238U, il faut mesurer pour chaque échantillon le rapport 150Nd/148Nd, car il est très sensible à la participation des fissions de 238U, elle-même dépendant de l'usure du gadolinium.

Dans le cadre de GEDEON, le taux de combustion mesuré par le 148Nd confirme le taux d'irradiation déduit de l'appauvrissement en 235U. En principe, cette dernière grandeur conduit à la meilleure détermination du taux d'irradiation, mais cela implique la parfait connaissance de l'enrichissement initial (homogénéité des lots). On ne prévoit qu'une mesure de recalage du Nd sur la disparition de l'U235.

VII.3 CONCLUSION SUR L'EXPERIENCE GEDEON

L'expérience GEDEON est conçue de manière à suivre pas à pas l'évolution des compositions isotopiques et des mesures de distributions de puissance pour les crayons empoisonnés au gadolinium et leur environnement.

On a montré que l'évolution de 4 crayons gadoliniés dans un assemblage 13 x 13 de type PWR pouvait être réalisée en minimisant les sources de perturbation parasite (influence du coeur nourricier, interaction entre les différents crayons gadoliniés).

Le dispositif expérimental adopté permet l'extraction des crayons UO_2 - Gd_2O_3 ou UO_2 à différents taux de combustion. Le choix de ces derniers est déduit de l'étude de sensibilité aux sections efficaces et au niveau de flux que nous avons effectuée. Cette étude a montré que les erreurs sur les sections efficaces du ^{155}Gd et ^{157}Gd ainsi que sur le niveau de flux sont amplifiées à certains taux de combustion et pour des zones spatiales (dans le crayon gadolinié) bien définis. La stratégie de déchargement et de remplacement des quatre crayons gadoliniés présents dans l'assemblage 13 x 13 permet d'étudier différentes teneurs en gadolinium cobroyé ou éventuellement du gadolinium en grains.

Le programme de mesures associé à cette expérience donnera des données précises sur la composition isotopique et spatiale du poison, de l'uranium et sur les distributions de puissance au voisinage des crayons gadoliniés pour différents taux de combustion.

La comparaison expérience-calcul devrait alors permettre d'améliorer la précision des évaluations des données nucléaires du gadolinium et du calcul de l'efficacité des poisons consommables gadoliniés.

VIII CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette thèse contribue à la qualification des données nucléaires du gadolinium pour son utilisation comme poison consommable dans les réacteurs à eau pressurisée. Cette étude s'appuie d'une part sur un programme expérimental réalisé en 1981 dans le réacteur MINERVE installé au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, et d'autre part sur l'expérience GEDEON qui débutera fin 1982 dans la pile MELUSINE du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble.

Une étude de sensibilité sur les paramètres neutroniques d'une cellule gadoliniée dans un réseau combustible a permis de sélectionner les paramètres importants du gadolinium, à savoir :

- la nature du support, puis pour chaque type de support,
  - . la charge en gadolinium,
  - . la nature du gadolinium, (cobroyé ou en grains de différents diamètres).

Les échantillons d'oscillations ont donc été réalisés puis regroupés en séries distinctes, de manière à associer à chacune l'étude d'un des trois paramètres cités plus haut.

Pour avoir l'effet de plusieurs crayons gadoliniés en interaction, on a procédé à des mesures d'efficacité de grappes constituées chacune de neuf crayons UO_2 - Gd_2O_3. Ces grappes sont différentes soit par leur enrichissement en ^{235}U, soit par leur teneur en Gd_2O_3, soit encore par la nature du gadolinium (cobroyé ou en grains).

La suite de ce travail a ensuite consisté en la définition d'un schéma de calcul approprié à des réseaux contenant une ou plusieurs hétérogénéités gadoliniées. Les difficultés se situent à deux niveaux :

- au niveau du crayon gadolinié, on doit découper celui-ci en plusieurs zones équivolumiques pour bien prendre en compte la structure fine du flux entre la surface du crayon poison et son centre. De plus, un phénomène de double hétérogénéité apparait lorsque le gadolinium se présente sous forme de grains. La comparaison de

trois méthodes traitant ce problème a montré la cohérence entre celles-ci et l'on a choisi le module BIHET du code APOLLO, qui est par ailleurs le plus souple d'emploi,

- au niveau du couplage entre les différentes cellules d'un réseau empoisonné au gadolinium, l'examen des différentes options de calcul multicellules conduit à adopter le module EURYDICE dans son option ROTHx4, du fait de son rapport optimum précision/prix, pour traiter le cas d'une ou plusieurs hétérogénéités gadoliniées nécessitant une étendue relativement importante du motif multicellules à étudier.

Avant de confronter les résultats expérimentaux aux résultats calculés, on a effectué sur les mesures expérimentales des corrections de masse de gainage, de longueur et d'effet de bout. Ce dernier traduit l'absorption des neutrons par les extrémités supérieure et inférieure des échantillons absorbants qu'on ne prend pas en compte dans les calculs. Cet effet a été mesuré expérimentalement et tend vers le modèle théorique du corps noir (absorption proportionnelle à la surface du poison).

Les écarts expérience-calcul concernant les échantillons à Gd_2O_3 cobroyé montrent que le jeu de sections efficaces actuellement recommandé pour les isotopes du gadolinium (notamment pour les isotopes impairs) a un niveau d'intégrale de résonance satisfaisant. On observe une surestimation de l'effet en réactivité, par le calcul, aux faibles charges en Gd_2O_3. Une étude de sensibilité aux sections des isotopes ^{155}Gd et ^{157}Gd et à l'approximation multicellules utilisée dans l'interprétation a montré que cette tendance ne peut s'expliquer que par la mauvaise connaissance des teneurs en Gd_2O_3 pour les échantillons faiblement chargés (les analyses chimique et par transmission gamma ne sont pas en accord) ; de plus l'écart obtenu est trop fort pour culpabiliser les sections thermiques des isotopes impairs du gadolinium. On peut conclure que, dans la plage d'utilisation du gadolinium comme poison consommable (200 à 800 mg/cm3) le calcul APOLLO surestime très légèrement l'antiréactivité du poison (+ 0.5 % ± 3.5 %).

En ce qui concerne le gadolinium sous forme de grains, on a montré que le schéma de calcul APOLLO (EURYDICE ROTHx4) avec son module BIHET permet de calculer ce type de poison avec une précision de ± 5 % ; cela est suffisant pour mener des calculs de projet.

D'autre part, pour simuler du combustible UO_2 - Gd_2O_3 irradié, on a réalisé des échantillons à deux couronnes concentriques dont la teneur en Gd_2O_3 et l'enrichissement en ^{235}U sont variables. L'interprétation des mesures d'oscillations donne des résultats cohérents avec ceux obtenus pour les échantillons homogènes (surestimation de l'efficacité des crayons faiblement empoisonnés).

Nous pensons qu'il serait intéressant de lever l'incertitude sur les faibles teneurs en Gd_2O_3 par une nouvelle campagne d'oscillations d'échantillons d'alumine gadoliniée. Par ailleurs, la campagne servant de support à cette thèse a donné des informations fort intéressantes pour diminuer les sources d'erreurs et minimiser les incertitudes expérimentales (bonne connaissance en Gd_2O_3, échantillons à faible teneur en Gd_2O_3 et à d'autres teneurs très différentes afin de découpler les différents types d'erreurs, caractéristiques géométriques identiques pour tous les échantillons avec une hauteur $\geqslant$ 10 cm pour minimiser l'effet de bout, normalisation au bore).

L'interprétation préliminaire des mesures d'efficacité de grappes a permis de constater l'équivalence en réactivité des grappes UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 cobroyé (300 mg/cm3) et UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3). Ce résultat devrait être confirmé par des calculs de coeur qui prennent en compte le couplage entre les zones expérimentale et nourricière.

La deuxième partie de cette thèse concerne l'étude de faisabilité de l'expérience GEDEON. Celle-ci consiste à irradier 4 crayons gadoliniés dans un assemblage 13 x 13 placé au centre du réacteur MELUSINE. Le but du travail réalisé a été tout d'abord de vérifier la faisabilité neutronique de l'expérience de façon à s'assurer de la bonne représentativité de l'expérience (spectre proche de celui des PWR, absence de perturbation trop importante). Suite à une étude de sensibilité, on a proposé un programme de mesures permettant de mettre en évidence les éventuelles erreurs liées aux calculs (sections efficaces et schéma de calcul).

Toutefois, des expériences complémentaires sont encore nécessaires pour qualifier les données nucléaires du gadolinium au temps zéro. Il serait intéressant de réaliser d'autres campagnes d'oscillations mieux appropriées (spectres différents, échantillons avec isotope Gd séparé) et plus précises.

R E F E R E N C E S

/1/ M. NASR
Interprétation de résultats expérimentaux, du taux de réaction, effets en réactivité et perturbations locales dans des réseaux eau légère.
Thèse de 3ème cycle ORSAY (1976)

/2/ L. MARTIN - DEIDIER - J. GUERANGE - P. ROLLAND
Mesures par oscillations d'échantillons d'alumine gadoliniée dans MINERVE.
Note Technique SEN/LPRE 79 - 86 (MARS 1979)

/3/ M. DARROUZET - M. ROBIN
Echantillons UO_2 - Gd_2O_3 "NUCLITAL" irradiés dans SILOE : résultats des analyses et des mesures par oscillations.
Rapport SEN - 067 (DECEMBRE 1978)

/4/ P. CHAUCHEPRAT
Rapport de stage du D.E.A. de Physique des Réacteurs
(MAI 1980)

/5/ A. ARRIOLA
Etudes expérimentales de caractéristiques neutroniques de réseaux de réacteur à eau pressurisée.
Thèse de 3ème cycle ORSAY (1978)

/6/ M. J. BASIUK - J. MONDOT
Interprétation des expériences AZUR - Coeur 4 éléments avec hétérogénéités.
Rapport SERMA/SPM N° 218T.

/7/ P. BIOUX - J.B. THOMAS
Interprétation des expériences AZUR CAP 1800. Coeur 4 éléments avec différents types d'absorbants.
Rapport SEN N° 27.

/8/ P. THEROND
Qualification du schéma NEPTUNE : Interprétation des expériences "AZUR CAP 1800" relatives aux barreaux d'UO_2 - Gd_2O_3.
Note Technique SEN/LPN N°2 (OCTOBRE 1981)

/9/ J. BAZIN - A. MANIN - T. PINEIRA
Irradiation de combustible empoisonné au gadolinium. Résultats de l'expérience LOCUSTE.
Note Technique SECS - SELECI N° 411 (JANVIER 1979)

/10/ A. SANTAMARINA - B. NOUVEAU
Interprétation de l'expérience CRISTO III. Antiréactivité introduite par la dilution de gadolinium dans un réseau à faible modération.
Rapport SEN N° 114 (FEVRIER 1981)

/11/ G. NAUDAN
Irradiations de plaques d'alumine gadoliniée dans un coeur "Caramels" d'AZUR.
Note SEN/LPN N° 096 CD.

/12/ P. THEROND
Qualification du schéma NEPTUNE : Interprétation des expériences AZUR - Caramel relatives aux lattes d'alumine gadoliniée.
Note Technique SEN/LPN N°191 (JUIN 1981)

/13/ P. CHAUCHEPRAT - L. MARTIN DEIDIER - G. GRANGET
Expérience Mélodie IV : Etude expérimentale de la capture du gadolinium dans un spectre de réacteur à eau pressurisée.
Note Technique SEN/LPRE N° 81-149.

/14/ P. PASCAL et Cie
Nouveau traité de chimie minérale
Tome VII (1959)

/15/ R. PANNETIER
Vade-mecum du technicien nucléaire Tome II
Deuxième Edition (1980)

/16/ P. REUSS
Schéma standard du calcul neutronique des réacteurs à neutrons thermiques (3ème édition)
Note SERMA/SPM N° 1274 "T" (1979)

/17/ J. BOUCHARD - JC CARRE
La Pile MINERVE
Bulletins d'Informations Scientifiques et Techniques du C.E.A.
N° 168
(MARS 1972)

/18/ M. BRUNET - M. DARROUZET
Mesures par oscillations dans les ensembles critiques.
Bulletins d'Informations Scientifiques et Techniques du C.E.A
N° 170 (MAI 1972)

/19/ J. BOUCHARD
Constantes relatives aux neutrons retardés.
Contrat CCE/EDF/CEA - Note Technique A04 (1978)

/20/ M. NASR
Etude des poisons consommables et qualification du gadolinium dans les réacteurs à eau.
Thèse d'Etat ORSAY (1979)

/21/ J. MONDOT
Calcul du facteur d'autoprotection microscopique pour un milieu absorbant sous forme de grains.
Note Technique SEN/LPN N° 76/011 (1976)

/22/ W.B. DOUB
Self Shielding of boran carbide spheres embedded in a plat (W. BAPD)

/23/ D. HILBERT and al.
"Geometry and imagination"
Page 47 Chelsea Publishing Compagny - New York (1952)

/24/ CASE - HOFFMAN - PLACZEK
Introduction to the theory of neutron diffusion (Vol. 1)

/25/ A. HEBERT
Estimation des probabilités de collision pour des géométries contenant des grains.
Rapport SERMA/SPM N° 404 "T" (1979)

/26/ A. KAVENOKY
Calcul et utilisation des probabilités de première collision pour des milieux hétérogènes à une dimension : les programmes ALCOLL et CORTINA.
Note CEA - N - 1077 (1969)

/27/ A. SANTAMARINA
Calcul des assemblages PWR. Qualification du système NEPTUNE sur les expériences MELODIE dans MINERVE.
Communication au Comité Technique sur les méthodes d'homogénéisation en physique des réacteurs. LUGANO (13 - 15 Novembre 1978).

/28/ B. NOEL
Contribution à l'élaboration du schéma de calcul neutronique des réacteurs nucléaires modérés à l'eau et à combustibles en plaques.
Thèse de 3ème cycle ORSAY (1977)

/29/ L. ERRADI, A. SANTAMARINA
Schéma de calcul de l'expérience CREOLE. Etude de la condensation en énergie des sections efficaces.
Note SEN/LPRE N° 79-99.

/30/ A. BOIVINEAU
Système Neptune
Manuel d'utilisation du module APOLLO
Rapport SERMA/SPN N° 435 "DR"

/31/ A. BOIVINEAU - R. SANCHEZ
APOLLO 2D - Mode d'utilisation des modules "NAUSICAA" et "CALLIOPE"
Note SERMA/SPM N° 1014 "DR".

/32/ R. STANKOWSKY
APOLLO 2D - Mode d'utilisation du module "MARSYAS"
Note SERMA/SPM N° 1054 "DR"

/33/ G. GRANGET - A. SANTAMARINA
Calcul des assemblages PWR avec grappe de contrôle.
Qualification sur les expériences Mélodie dans MINERVE.
Note Technique SEN/LPRE 79-94 (JUIN 1979)

/34/ D. TOURNIER
Contribution à la qualification du système NEPTUNE. Application au suivi de Tihange.
Thèse de 3ème cycle ORSAY (AOUT 1980)

/35/ P. THEROND
Communication personnelle

/36/ P. CHAUCHEPRAT
Résultats et interprétation préliminaire des expériences réalisées dans MINERVE pour la qualification du gadolinium.
Note Technique SEN/LPRE N° 82-181 (JANVIER 1982)

/37/ Dossier de caractérisation 4/78
Note Technique DTech-ECS N° 78/1270 (MAI 1978)

/38/ A. SANTAMARINA
Interprétation cohérente de l'ensemble des expériences critiques réalisées au C.E.A. sur le gadolinium
Rapport SEN 82/156 (JUILLET 1982)

/39/ M. GUERY
Mesures par transmission gamma d'échantillons d'alumine gadoliniée.
Note STA/SECMA 79 - CR/15

/40/ A. LEDAT - R. RONZEAU - J. SEQUIES
Fabrication de pastilles d'UO_2 à poison consommable (sphères de Gd_2O_3) pour études neutroniques au DRE/SEN/LPRE - CEN CADARACHE
Compte rendu DMG N° DR 28/81 (SEPTEMBRE 1981)

/41/ M. ROBIN - M. DARROUZET - A. GIACOMETTI - R. GIRIEUD et al.
Détermination expérimentale des sections efficaces des isotopes de Pu, Am et Cm dans un spectre de neutrons de réacteurs à eau.
Rapport SEN 109 (JANVIER 1981)

/42/ D. VANHUMBEECK
Configuration Melusine 68A. Irradiation du dispositif GEDEON.
Note physique N° 360 Pi/Phy 703-037/82 (JANVIER 1982)

/43/ M. NASR
Influence des isotopes pairs du gadolinium.
Note SERMA/SPM N° 1277 "T" (DECEMBRE 1979)

A N N E X E A

COMPARAISON ENTRE DEUX CALCULS NAUSICAA P1 (91 POINTS ET 70 POINTS) SUR LA CONFIGURATION AVEC 1 CRAYON UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3)

Nous avons effectué un calcul NAUSICAA P1 à 7 groupes avec 91 points de calcul sur la configuration avec un crayon UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (200 mg/cm3).

Le découpage géométrique des cellules est donné en figure 1.A. Par rapport à la figure 23, on remarque la présence de 4 secteurs supplémentaires dans le modérateur des cellules 7 à 15.

Le tableau 1A donne les taux de fission par cellule pour les deux calculs NAUSICAA P1 (91 points et 70 points). Les écarts, inférieurs au pour mille, ne sont pas significatifs, ce qui montre que le calcul à 70 points est suffisant.

TAUX DE FISSION PAR CELLULE

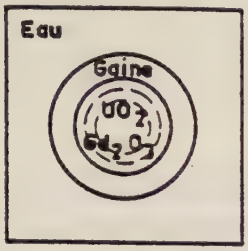
Numéro cellule	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
NAUSICAA P1 91 pts	0.3208	0.9014	0.9491	0.9673	0.9761	0.9865	0.9879	0.9901	0.9938	0.9970	0.9949	0.9957	0.9973	0.9989	1*
NAUSICAA P1 70 pts	0.3210	0.9021	0.9499	0.9682	0.9770	0.9872	0.9885	0.9907	0.9941	0.9971	0.9947	0.9956	0.9973	0.9990	1*

* Normé sur la cellule la moins perturbée

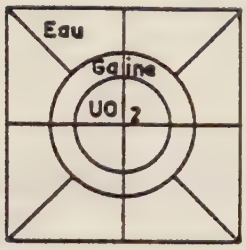
CONFIGURATION AVEC 1 CRAYON UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 200 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

ANNEXE A : TABLEAU 1 A

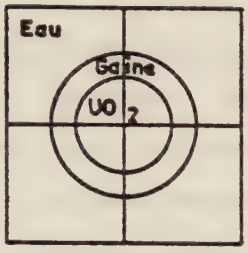
Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3)



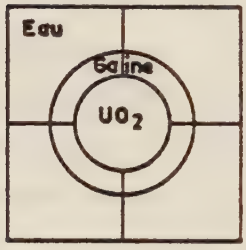
Cellule 2



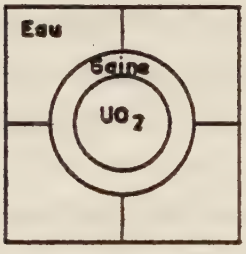
Cellule 3



Cellules 4 à 6



Cellules 7 à 15



Multicellules NAUSICAA P1 (91 points)

_ Découpage géométrique des cellules _

Annexe A . FIG : 1 A .

A N N E X E B

ELABORATION DE LA TAILLE DU MOTIF MULTICELLULES A UTILISER POUR L'INTERPRETATION DES MESURES PAR OSCILLATIONS

1°) POSITION DU PROBLEME

La perturbation due à l'introduction d'un échantillon absorbant au centre du réseau d'oscillations affecte d'une part le flux neutronique et d'autre part le spectre énergétique d'une partie de la zone expérimentale. Pour cette campagne d'oscillations, le réseau expérimental Mélodie IV comportait 741 crayons combustibles UO_2 enrichi à 3.5 %. Il est évident que nos calculs devront porter sur une étendue beaucoup plus restreinte. Cependant, nous devons choisir un motif multicellules répondant aux critères suivants :

- le niveau de flux existant en périphérie de ce motif doit être "asymptotique", c'est-à-dire correspondant au niveau de flux qu'on aurait en mode fondamental en absence de perturbation,

- le spectre de la cellule la plus éloignée de la perturbation dans le motif multicellules doit être identique à celui régnant dans le réseau sans hétérogénéité.

Si ces deux conditions sont satisfaites dans le multicellules, les variations des taux de réaction liées à la perturbation seront bien prises en compte.

2°) CALCULS REALISES

Des études /1/ ont montré qu'un motif multicellules de taille 15 x 15 est généralement suffisant pour traiter le cas d'une forte perturbation. Nous avons donc réalisé un calcul multicellules "ROTH" à 99 groupes sur le motif 15 x 15 représenté sur la figure 1.B.a.

Du centre à la périphérie, on observe :

- la cellule centrale qui comporte l'échantillon d'oscillation et le dispositif expérimental.
  Comme il s'agit d'un problème d'optimisation, nous avons pris l'échantillon le plus chargé en Gd_2O_3 (c'est à dire l'échantillon D8 dont la teneur en Gd_2O_3 est de 2000 mg/cm^3),

- 7 rangées de cellules "tampons".
  Nous avons retenu cette stratégie plutôt que la stratégie "faces et angles" suite à l'étude décrite en /27/. De plus, on adoptera la même représentation du motif pour l'interprétation des mesures.

3°) RESULTATS

Nous donnons les résultats obtenus sur les 4 macrogroupes habituels /16/ utilisés en diffusion. Sur le tableau 1B, on donne la distribution spatiale du flux moyen total et du flux moyen thermique dans le motif étudié. On remarque que le flux a atteint son niveau asymptotique à partir de la cellule n°5 : en effet, les écarts obtenus entre cette cellule et ses suivantes est de l'ordre de quelques pour-mille. Le tableau 2B est relatif au spectre régnant dans les différentes cellules du motif. On voit que quatre rangées de cellules sont nécessaires pour éteindre la perturbation : le spectre de la cellule n°5 est identique à celui de la cellule UO_2 du réseau en milieu infini.

4°) CONCLUSION

Cette étude permet de fixer la taille du motif multicellules dont on a besoin pour interpréter les mesures par oscillations. Dès que l'on atteint la cellule n°5, on n'observe plus de variation de flux ou de spectre. Par ailleurs, nous nous sommes assurés de la validité de l'étendue de ce motif en considérant la perturbation la plus forte (charge de 2000 mg/cm3 en Gd_2O_3) que nous aurons à traiter.

Nous adopterons donc un motif multicellules de taille 15 x 15 mais avec un nombre de cellules physiques limité à 5 comme le montre la figure 1B b.

CELLULE	$\bar{\phi}$ total	$\bar{\phi}$ thermique
1	0.79762	0.29250
2	0.87688	0.32262
3	0.89732	0.35190
4	0.90565	0.36237
5	0.90959	0.36670
6	0.91157	0.36862
7	0.91254	0.36950
8	0.91293	0.36984

VARIATIONS DU FLUX TOTAL ET DU FLUX THERMIQUE DANS LE MOTIF MULTICELLULES

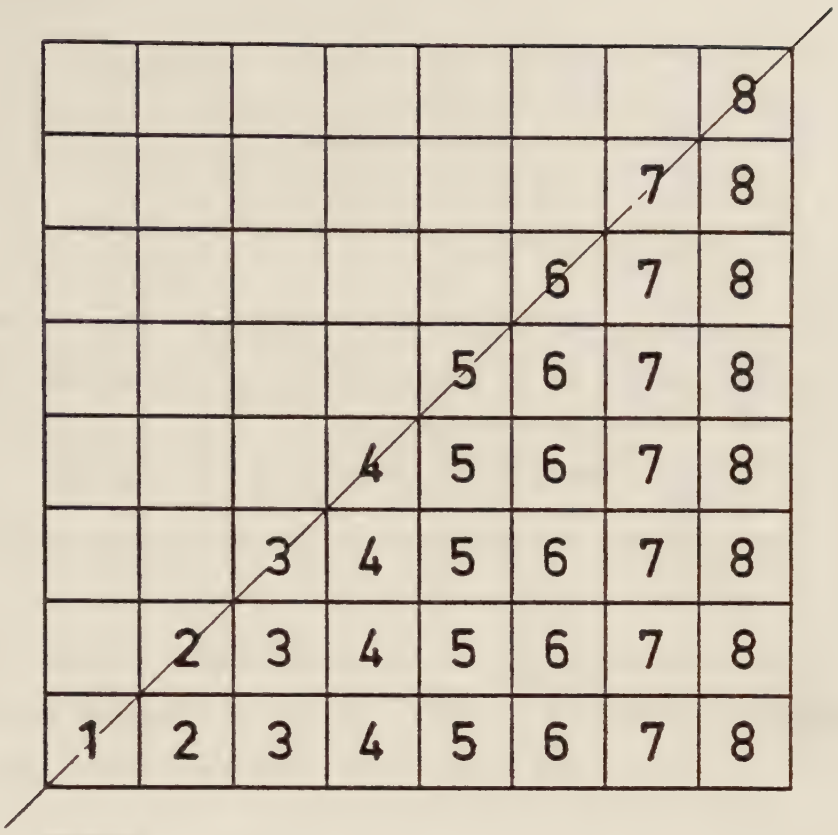
TABLEAU 1B

CELLULE	$\frac{\phi 1}{\phi t}$ (%)	$\frac{\phi 2}{\phi t}$ (%)	$\frac{\phi 3}{\phi t}$ (%)	$\frac{\phi 4}{\phi t}$ (%)
1	26.60	41.82	29.68	1.90
2	25.06	36.60	25.81	12.53
3	24.96	36.20	25.46	13.37
4	24.91	36.10	25.35	13.65
5	24.87	36.06	25.31	13.76
6	24.85	36.05	25.30	13.80
7	24.84	36.04	25.30	13.82
8	24.84	36.04	25.30	13.82

$$\phi t = \sum_{i=1}^{4} \phi_i$$

VARIATION DU SPECTRE DANS LE MOTIF MULTICELLULES ETUDIE

TABLEAU 2 B



I : numéro de la cellule physique

Fig: 1.B.a _ Représentation du motif multicellules

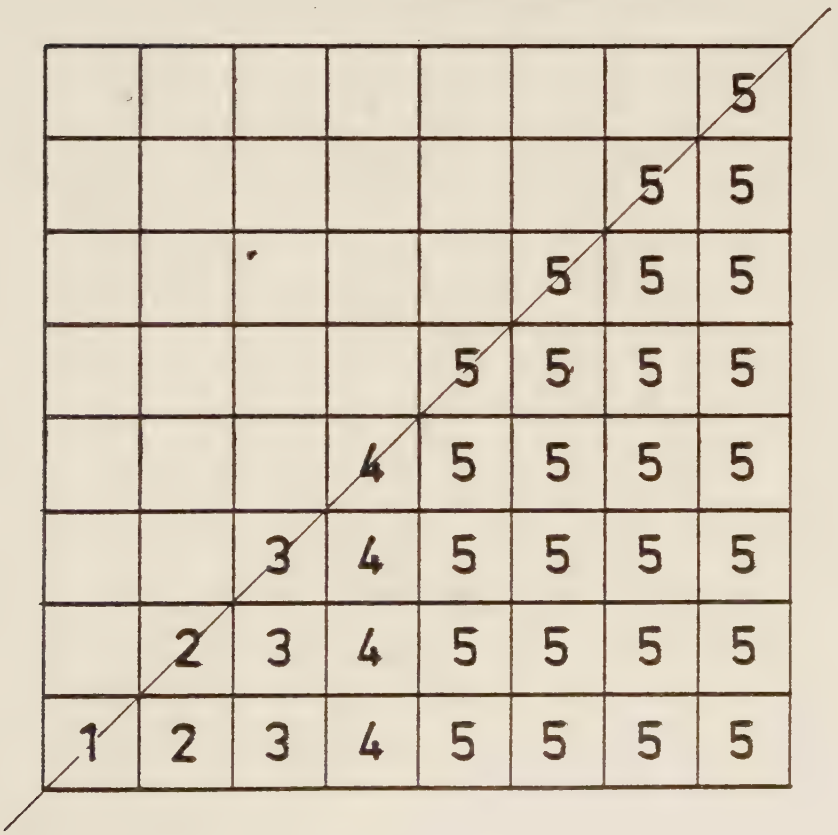


Fig: 1.B.b _ Représentation du motif multicellules _

Référence UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (3 %) Ø comb. 8,05 mm

$Ø_{gaine}$: 8,2 x 9,4 mm ; pas 11,4 mm ; T_{eau} = 30°C

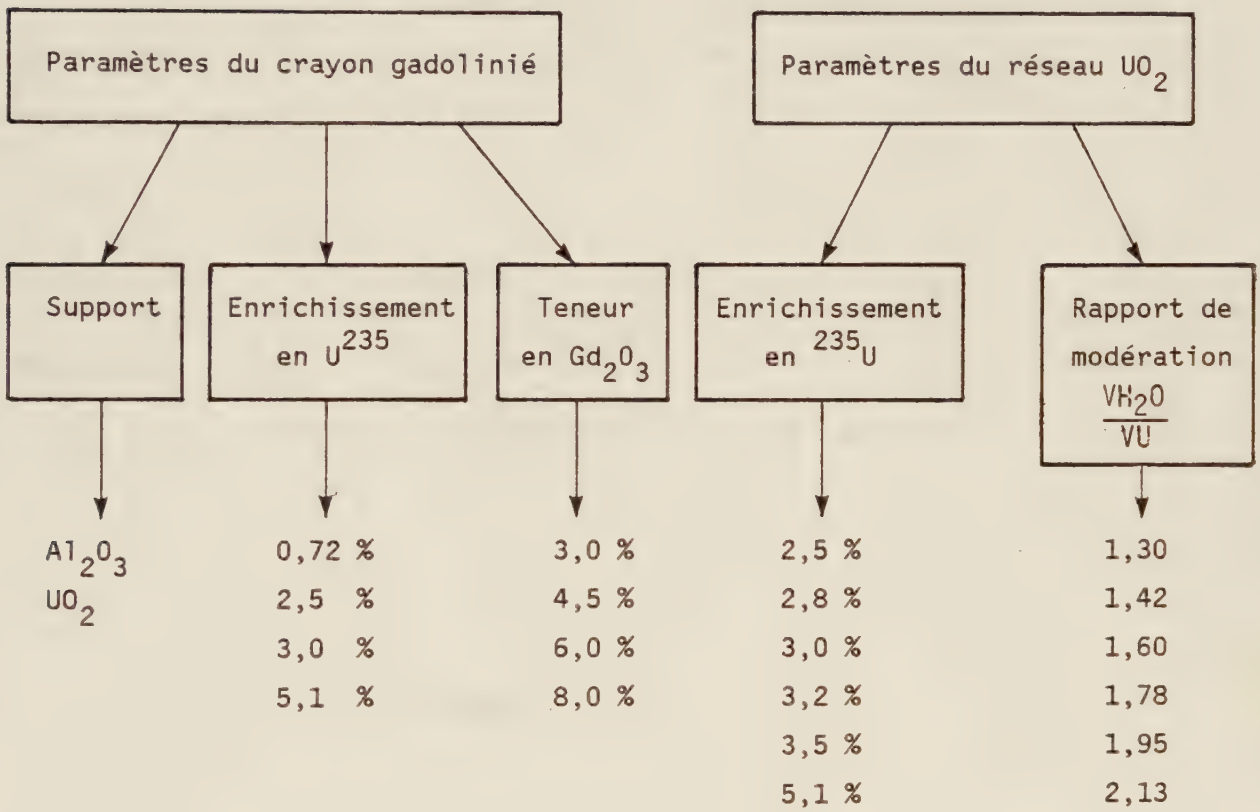


TABLEAU 1

DECOUPAGE A 4 MACROGROUPES

Numéro du macrogroupe	Léthargie limite	Energie limite
1	2,4	10 MeV → 0.907 MeV
2	7,6	5.005 keV
3	16,588	0.625 eV
4	25,233	0.11 meV

TABLEAU 2

COMPARAISON DES PARAMETRES NEUTRONIQUES
DE LA CELLULE MELODIE IV ET D'UNE CELLULE DE REACTEUR PWR
(enrichissement combustible : 3,5 %)

PARAMETRES NEUTRONIQUES	CELLULE PWR	CELLULE MELODIE IV
$K\infty$	1.35766	1.38367
M^2 (cm^2)	57.15	57.83
B^2 (cm^{-2})	$6.2414\ 10^{-3}$	$6.6179\ 10^{-3}$
ϕ_1/ϕ_4	6.85	6.63
ϕ_2/ϕ_4	4.46	4.43
ϕ_3/ϕ_4	1.72	1.79

TABLEAU 3

DENOMINATION	TYPE D'ECHANTILLONS	CONTENU				GAINAGE	
		Ø pastille (mm)	longueur pastille (mm)	Nombre de pastilles	Masse des pastilles (g)	Masse étuis + bouchons (g)	Masse cales tubulaires (g)
D1	Al_2O_3-Gd_2O_3 cobroyé à 1 % de Gd	8.2	12.0	3	7.389	5.740	0.687
D2	" " " à 2 % de Gd	8.2	12.0	3	7.442	5.721	0.711
D3	" " " à 4 % de Gd	8.2	12.0	3	7.578	5.734	0.714
D4	" " " à 8 % de Gd	8.2	12.0	3	7.746	5.718	0.686
D5	" " " à 12 % de Gd	8.2	12.0	3	7.945	5.736	0.727
D6	" " " à 16 % de Gd	8.2	12.0	3	8.122	5.743	0.753
D7	" " " à 22 % de Gd	8.2	12.0	3	8.401	5.738	0.797
D8	" " " à 40 % de Gd	8.2	12.0	3	9.525	5.721	0.719
D9	Alumine	8.2	12.0	3	7.332	5.724	0.687
D10	Etui vide avec cale tubulaire					5.750	14.714
D11	Etui vide					5.752	0.
B1	Al_2O_3-Gd_2O_3 grains 198 µm à 2 % de Gd	8.2	12.0	3	7.445	5.724	0.726
B2	" " " " à 4 % de Gd	8.2	12.0	3	7.549	5.737	0.739
B3	" " " " à 8 % de Gd	8.2	12.0	3	7.716	5.736	0.728
B4	Al_2O_3-Gd_2O_3 grains 376 µm à 2 % de Gd	8.2	12.0	3	7.445	5.594	0.716
B5	" " " " à 4 % de Gd	8.2	12.0	3	7.559	5.722	0.729
B6	" " " " à 8 % de Gd	8.2	12.0	3	7.692	5.785	0.727

TABLEAU 4

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS D'OSCILLATIONS DES SERIES B ET D

DENOMINATION	TYPE D'ECHANTILLONS	CONTENU					GAINAGE	
		ø pastille (mm)	longueur pastille (mm)	Nombre de pastilles Al_2O_3-Gd_2O_3	Nombre de pastilles Al_2O_3	Masse des pastilles (g)	Masse étuis + bouchons (g)	Masse cales tubulaires (g)
F1	Al_2O_3-Gd_2O_3 cobroyé à 1 % de Gd	8.2	12.0	1	12	31.773	18.941	0.457
F2	" " " " " "	8.2	12.0	3	10	31.812	18.941	0.457
F3	" " " " " "	8.2	12.0	5	8	31.844	18.941	0.457
F4	" " " " " "	8.2	12.0	7	6	31.903	18.941	0.457
F5	Al_2O_3-Gd_2O_3 cobroyé à 4 % de Gd	8.2	12.0	1	12	31.830	18.941	0.457
F6	" " " " " "	8.2	12.0	3	10	31.986	18.941	0.457
F7	" " " " " "	8.2	12.0	5	8	31.132	18.941	0.457
F8	" " " " " "	8.2	12.0	7	6	32.311	18.941	0.457
F9	Al_2O_3-Gd_2O_3 cobroyé à 8 % de Gd	8.2	12.0	1	12	31.888	18.941	0.457
F10	" " " " " "	8.2	12.0	3	10	32.152	18.941	0.457
F11	" " " " " "	8.2	12.0	5	8	32.424	18.941	0.457
F12	" " " " " "	8.2	12.0	7	6	32.709	18.941	0.457
F13	Alumine	8.2	12.0	0	13	31.751	18.941	0.457

TABLEAU 5

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS D'OSCILLATIONS DE LA SERIE F

DENOMINATION	TYPE D'ECHANTILLONS	CONTENU				GAINAGE	
		Ø pastille (mm)	longueur pastille (mm)	Nombre de pastilles	Masse des pastilles (g)	Masse étuis + bouchons (g)	Masse cales tubulaires (g)
A1	UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 cobroyé à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3	8.19	11.1	4	23.774	5.951	0.
A2	UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 50 µm à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3	8.19	11.1	4	22.537	5.746	0.
A3	UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 100 µm à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3	8.19	11.1	4	23.229	5.842	0.
A4	UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 200 µm à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3	8.19	11.1	4	22.744	5.755	0.
A5	UO_2 (5.1 %) Gd_2O_3 400 µm à 300 mg/cm3 de Gd_2O_3	8.19	11.1	4	23.290	5.904	0.

TABLEAU 6

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS D'OSCILLATIONS DE LA SERIE A

DENOMINATION	TYPE D'ECHANTILLONS	CONTENU				GAINAGE	
		Ø pastille (mm)	longueur pastille (mm)	Nombre de pastilles	Masse des pastilles (g)	Masse étuis + bouchons (g)	Masse cales tubulaires (g)
C1	UO_2 naturel	8.05	10.0	4	20.973	5.733	0.272
C2	UO_2 nat. Gd_2O_3 cobroyé à 1 % de Gd	8.05	10.0	4	21.207	5.749	0.263
C3	UO_2 nat. Gd_2O_3 cobroyé à 2 % de Gd	8.05	10.0	4	20.970	5.741	0.278
C4	UO_2 nat. Gd_2O_3 cobroyé à 3 % de Gd	8.05	10.0	4	20.880	5.743	0.270
C5	UO_2 (2 %)	8.05	10.0	4	21.135	5.706	0.288
C6	UO_2 (2 %) Gd_2O_3 cobroyé à 0.5 % de Gd	8.05	10.0	4	21.324	5.681	0.291
C7	UO_2 (2 %) Gd_2O_3 cobroyé à 1 % de Gd	8.05	10.0	4	21.087	5.748	0.286
C8	UO_2 (3 %)	8.05	10.0	4	20.915	5.760	0.290
C9	UO_2 (3 %) Gd_2O_3 cobroyé à 0.5 % de Gd	8.05	10.0	4	21.075	5.741	0.275
C10	UO_2 (3 %) Gd_2O_3 cobroyé à 1 % de Gd	8.05	10.0	4	20.141	5.854	0.156
C11	UO_2 (3 %) Gd_2O_3 cobroyé à 2 % de Gd	8.05	10.0	4	21.164	5.793	0.288
C12	UO_2 (3 %) Gd_2O_3 cobroyé à 3 % de Gd	8.05	10.0	4	19.975	5.986	0.228

TABLEAU 7

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS D'OSCILLATIONS DE LA SERIE C

ECHANTILLONS	MESURES BRUTES
D1	- 21370 ± 120
D2	- 24340 ± 120
D3	- 27050 ± 120
D4	- 29900 ± 120
D5	- 31620 ± 120
D6	- 32710 ± 120
D7	- 33850 ± 120
D8	- 37050 ± 120
D9	- 450 ± 120
D10	- 420 ± 120
D11	- 220 ± 120
B1	- 13780 ± 120
B2	- 18720 ± 120
B3	- 25410 ± 120
B4	- 10050 ± 120
B5	- 15330 ± 120
B6	- 21690 ± 120

TABLEAU 8

RESULTATS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS Al_2O_3 - Gd_2O_3
SERIES B ET D

ECHANTILLONS	MESURES BRUTES
F1	- 10700 ± 120
F2	- 23100 ± 120
F3	- 34660 ± 120
F4	- 46270 ± 120
F5	- 13120 ± 120
F6	- 28590 ± 120
F7	- 43210 ± 120
F8	- 57580 ± 120
F9	- 14350 ± 120
F10	- 30910 ± 120
F11	- 46950 ± 120
F12	- 62800 ± 120
F13	- 2410 ± 120

TABLEAU 9

RESULTATS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS Al_2O_3 - Gd_2O_3
SERIE F

ECHANTILLONS	MESURES BRUTES
A1	- 32250 ± 200
A2	- 28090 ± 200
A3	- 27740 ± 200
A4	- 25090 ± 200
A5	- 20600 ± 200

TABLEAU 10

RESULTATS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DE LA SERIE A

ECHANTILLONS		MESURES BRUTES
1ère SERIE	C1	- 2120 ± 120
	C5	- 970 ± 120
CONFIGURATION R1	C8	- 180 ± 120
2ème SERIE	C1	- 1950 ± 170
	C2	- 26620 ± 200
	C3	- 29970 ± 200
	C4	- 31240 ± 200
	C5	- 950 ± 200
	C6	- 22760 ± 200
	C7	- 26080 ± 170
	C8	- 210 ± 200
	C9	- 22033 ± 200
CONFIGURATION R2	C10	- 24970 ± 200
	C11	- 28540 ± 200
	C12	- 29730 ± 170

TABLEAU 10

RESULTATS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DE LA SERIE C

GRAPPE UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 (3 % cobroyé)

NUMERO DU CRAYON DONT ON MESURE LA REACTIVITE	REACTIVITE MESUREE (pcm)	CONFIGURATION DANS LA ZONE THERMIQUE
1	128	Figure 14-1
2	134	Figure 14-2
3	150	Figure 14-3
4	160	Figure 14-4
5	175	Figure 15-1
6	200	Figure 15-2
7	206	Figure 15-3
8	218	Figure 15-4
9	270	Figure 16-1

GRAPPE UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (2 %)

NUMERO DU CRAYON DONT ON MESURE LA REACTIVITE	REACTIVITE MESUREE (pcm)	CONFIGURATION DANS LA ZONE THERMIQUE
1	131	Figure 14-1
2	136	Figure 14-2
3	160	Figure 14-3
4	162	Figure 14-4
5	186	Figure 15-1
6	181	Figure 15-2
7	218	Figure 16-2
8	220	Figure 16-3
9	254	Figure 16-1

GRAPPE UO_2 (5.1 %) - Gd_2O_3 (3 % - Grains 380 µm)

NUMERO DU CRAYON DONT ON MESURE LA REACTIVITE	REACTIVITE MESUREE (pcm)	CONFIGURATION DANS LA ZONE THERMIQUE
1	111	Figure 16-4
2	110	Figure 15-1
3	118	Figure 17-1
4	130	Figure 15-2
5	156	Figure 15-3
6	150	Figure 17-2
7	150	Figure 17-3
8	164	Figure 16-3
9	194	Figure 16-1

CONFIGURATION 9 TROUS D'EAU

9 Trous d'eau	56	Figure 17-4

TABLEAU 11

EFFET DU DECOUPAGE SPATIAL DU CALCUL
SUR LES PARAMETRES GLOBAUX

	1 zone	3 zones	5 zones	7 zones
k_∞	1.35137	1.35141	1.35142	1.35143
τa^7	1.1298 E-2	1.1285 E-2	1.1281 E-2	1.1279 E-2
τa^5	2.9009 E-3	2.8980 E-3	2.8970 E-3	2.8966 E-3
τa	1.61299 E-2	1.61126 E-2	1.61076 E-2	1.61052 E-2
$\nu\tau f$	9.8866 E-4	9.8829 E-4	9.8822 E-4	9.8818 E-4

τa^7 et τa^5 sont respectivement les taux d'absorption du ^{157}Gd et ^{155}Gd ; τa et $\nu\tau f$ sont les taux d'absorption et de production dans le crayon UO_2 - Gd_2O_3.

TABLEAU 12

GROUPE	FK	FB	FA	$\frac{FB-FK}{FK}$ (%)	$\frac{FA-FK}{FK}$ (%)
52	9.8482E-01	9.8391E-01	9.8466E-01	-9.23E-02	-1.59E-02
53	9.1561E-01	9.1093E-01	9.1049E-01	-5.11E-01	-5.59E-01
54	9.8739E-01	9.8664E-01	9.8777E-01	-7.69E-02	3.82E-02
55	9.7651E-01	9.7510E-01	9.7618E-01	-1.45E-01	-3.44E-02
56	9.6961E-01	9.6782E-01	9.6885E-01	-1.85E-01	-7.84E-02
57	9.8848E-01	9.8777E-01	9.8895E-01	-7.23E-02	4.70E-02
58	9.9406E-01	9.9367E-01	9.9480E-01	-3.90E-02	7.54E-02
59	9.9566E-01	9.9533E-01	9.9643E-01	-3.29E-02	7.78E-02
60	9.9622E-01	9.9601E-01	9.9707E-01	-2.13E-02	8.54E-02
61	9.9654E-01	9.9633E-01	9.9734E-01	-2.18E-02	7.98E-02
62	9.9664E-01	9.9640E-01	9.9742E-01	-2.40E-02	7.74E-02
63	9.9661E-01	9.9641E-01	9.9738E-01	-2.03E-02	7.69E-02
64	9.9653E-01	9.9629E-01	9.9726E-01	-2.35E-02	7.34E-02
65	9.9636E-01	9.9612E-01	9.9706E-01	-2.39E-02	7.07E-02
66	9.9609E-01	9.9584E-01	9.9678E-01	-2.51E-02	6.88E-02
67	9.9578E-01	9.9553E-01	9.9643E-01	-2.55E-02	6.57E-02
68	9.9547E-01	9.9518E-01	9.9609E-01	-2.89E-02	6.24E-02
69	9.9519E-01	9.9489E-01	9.9579E-01	-3.06E-02	5.94E-02
70	9.9485E-01	9.9451E-01	9.9538E-01	-3.42E-02	5.39E-02
71	9.9430E-01	9.9393E-01	9.9478E-01	-3.76E-02	4.79E-02
72	9.9346E-01	9.9304E-01	9.9386E-01	-4.19E-02	4.07E-02
73	9.9226E-01	9.9176E-01	9.9253E-01	-4.98E-02	2.76E-02
74	9.9035E-01	9.8974E-01	9.9046E-01	-6.16E-02	1.06E-02
75	9.8734E-01	9.8662E-01	9.8725E-01	-7.30E-02	-9.42E-03
76	9.8273E-01	9.8169E-01	9.8218E-01	-1.06E-01	-5.61E-02
77	9.7663E-01	9.7524E-01	9.7558E-01	-1.42E-01	-1.07E-01
78	9.6949E-01	9.6764E-01	9.6778E-01	-1.91E-01	-1.76E-01
79	9.6022E-01	9.5787E-01	9.5781E-01	-2.45E-01	-2.51E-01
80	9.4867E-01	9.4565E-01	9.4535E-01	-3.18E-01	-3.50E-01
81	9.3279E-01	9.2897E-01	9.2835E-01	-4.09E-01	-4.76E-01
82	9.1201E-01	9.0715E-01	9.0615E-01	-5.33E-01	-6.42E-01
83	8.8245E-01	8.7625E-01	8.7480E-01	-7.03E-01	-8.67E-01
84	8.4197E-01	8.3420E-01	8.3220E-01	-9.23E-01	-1.16E+00
85	7.8423E-01	7.7447E-01	7.7192E-01	-1.24E+00	-1.57E+00
86	6.9714E-01	6.8551E-01	6.8233E-01	-1.67E+00	-2.12E+00
87	5.8215E-01	5.6945E-01	5.6594E-01	-2.18E+00	-2.79E+00
88	4.6270E-01	4.5057E-01	4.4701E-01	-2.62E+00	-3.39E+00
89	3.4383E-01	3.3361E-01	3.3055E-01	-2.97E+00	-3.86E+00
90	2.3503E-01	2.2751E-01	2.2523E-01	-3.20E+00	-4.17E+00
91	1.5599E-01	1.5083E-01	1.4934E-01	-3.31E+00	-4.26E+00
92	1.0681E-01	1.0323E-01	1.0230E-01	-3.35E+00	-4.22E+00
93	8.0854E-02	7.8137E-02	7.7521E-02	-3.36E+00	-4.12E+00
94	6.6869E-02	6.4618E-02	6.4173E-02	-3.37E+00	-4.03E+00
95	5.8615E-02	5.6643E-02	5.6281E-02	-3.36E+00	-3.98E+00
96	5.2001E-02	5.0251E-02	4.9960E-02	-3.37E+00	-3.92E+00
97	4.3415E-02	4.1953E-02	4.1733E-02	-3.37E+00	-3.87E+00
98	3.3837E-02	3.2698E-02	3.2537E-02	-3.37E+00	-3.84E+00
99	2.2068E-02	2.1327E-02	2.1234E-02	-3.36E+00	-3.78E+00

Al_2O_3 - Gd_2O_3 (2 %) - ϕ grains = 198 µm

TABLEAU 13

GROUPE	FK	FB	FA	$\frac{FB-FK}{FK}$ (%)	$\frac{FA-FK}{FK}$ (%)
52	9.7133E-01	9.6855E-01	9.7104E-01	-2.86E-01	-2.99E-02
53	8.4735E-01	8.3948E-01	8.3895E-01	-9.29E-01	-9.92E-01
54	9.7598E-01	9.7346E-01	9.7587E-01	-2.58E-01	9.13E-02
55	9.5580E-01	9.52231-01	9.5527E-01	-3.74E-01	-5.53E-02
56	9.4311E-01	9.3895E-01	9.4179E-01	-4.41E-01	-1.40E-01
57	9.7809E-01	9.7564E-01	9.7908E-01	-2.51E-01	1.01E-01
58	9.8850E-01	9.8667E-01	9.9013E-01	-1.85E-01	1.65E-01
59	9.9146E-01	9.8985E-01	9.9321E-01	-1.62E-01	1.77E-01
60	9.9263E-01	9.9114E-01	9.9443E-01	-1.50E-01	1.81E-01
61	9.9320E-01	9.9174E-01	9.9494E-01	1.47E-01	1.75E-01
62	9.9339E-01	9.9194E-01	9.9508E-01	-1.47E-01	1.70E-01
63	9.9334E-01	9.9192E-01	9.9501E-01	-3.43E-01	1.68E-01
64	9.9319E-01	9.9175E-01	9.9478E-01	-1.45E-01	1.61E-01
65	9.9288E-01	9.9140E-01	9.9441E-01	-1.49E-01	1.54E-01
66	9.9241E-01	9.9088E-01	9.9387E-01	-1.54E-01	1.48E-01
67	9.9181E-01	9.9024E-01	9.9322E-01	-1.58E-01	1.42E-01
68	9.9127E-01	9.8963E-01	9.9257E-01	-1.64E-01	1.31E-01
69	9.9073E-01	9.8908E-01	9.9199E-01	-1.67E-01	1.27E-01
70	9.9008E-01	9.8838E-01	9.9122E-01	-1.72E-01	1.15E-01
71	9.8908E-01	9.8729E-01	9.9008E-01	-1.80E-01	1.02E-01
72	9.8749E-01	9.8563E-01	9.8835E-01	-1.89E-01	8.63E-02
73	9.8522E-01	9.8320E-01	9.8583E-01	-2.06E-01	6.13E-02
74	9.8162E-01	9.7943E-01	9.8192E-01	-2.23E-01	3.10E-02
75	9.7611E-01	9.7360E-01	9.7588E-01	-2.58E-01	-2.32E-02
76	9.6747E-01	9.6442E-01	9.6641E-01	-3.16E-01	-1.10E-01
77	9.5612E-01	9.5254E-01	9.5417E-01	-3.74E-01	-2.04E-01
78	9.4288E-01	9.3864E-01	9.3982E-01	-4.49E-01	-3.24E-01
79	9.2597E-01	9.2108E-01	9.2172E-01	-5.28E-01	-4.58E-01
80	9.0512E-01	8.9938E-01	8.9941E-01	-6.34E-01	-6.31E-01
81	8.7701E-01	8.7020E-01	8.6958E-01	-7.76E-01	-8.48E-01
82	8.4105E-01	8.3307E-01	8.3163E-01	-9.48E-01	-1.12E+00
83	7.9160E-01	7.8222E-01	7.7997E-01	-1.19E+00	-1.47E+00
84	7.2716E-01	7.1641E-01	7.1334E-01	-1.48E+00	-1.90E+00
85	6.4142E-01	6.2950E-01	6.2586E-01	-1.86E+00	-2.43E+00
86	5.2581E-01	5.1338E-01	5.0922E-01	-2.36E+00	-3.04E+00
87	3.9632E-01	3.8454E-01	3.8199E-01	-2.97E+00	-3.62E+00
88	2.8626E-01	2.7627E-01	2.7480E-01	-3.49E+00	-4.00E+00
89	1.9685E-01	1.8947E-01	1.8858E-01	-3.75E+00	-4.20E+00
90	1.2796E-01	1.2342E-01	1.2252E-01	-3.55E+00	-4.28E+00
91	8.3013E-02	8.0374E-02	7.9524E-02	-3.18E+00	-4.20E+00
92	5.6345E-02	5.4536E-02	5.4031E-02	-3.03E+00	-4.11E+00
93	4.2526E-02	4.1229E-02	4.0821E-02	-3.05E+00	-4.01E+00
94	3.5126E-02	3.4044E-02	3.3749E-02	-3.08E+00	-3.92E+00
95	3.0773E-02	2.9816E-02	2.9582E-02	-3.11E+00	-3.87E+00
96	2.7290E-02	2.6435E-02	2.6248E-02	-3.13E+00	-3.82E+00
97	2.2772E-02	2.2053E-02	2.1915E-02	-3.16E+00	-3.76E+00
98	1.7740E-02	1.7176E-02	1.7079E-02	-3.18E+00	-3.73E+00
99	1.1557E-02	1.1194E-02	1.1141E-02	-3.14E+00	-3.60E+00

Al_2O_3 - Gd_2O_3 (2 %) - ϕ grains = 376 µm

TABLEAU 14

GROUPE	FK	FB	FA	$\frac{FB-FK}{FK}$ (%)	$\frac{FA-FK}{FK}$ (%)
52	9.7123E-01	9.6892E-01	9.7133E-01	-2.38E-01	9.69E-03
53	8.4695E-01	8.4125E-01	8.4024E-01	-6.73E-01	-7.92E-01
54	9.7592E-01	9.7385E-01	9.7710E-01	-2.12E-01	1.22E-01
55	9.5566E-01	9.5280E-01	9.5571E-01	-3.00E-01	4.51E-03
56	9.4295E-01	9.3970E-01	9.4234E-01	-3.45E-01	-6.45E-02
57	9.7805E-01	9.7595E-01	9.7929E-01	-2.14E-01	1.27E-01
58	9.8845E-01	9.8680E-01	9.9023E-01	-1.68E-01	1.80E-01
59	9.9146E-01	9.8998E-01	9.9328E-01	-1.49E-01	1.84E-01
60	9.9263E-01	9.9130E-01	9.9449E-01	-1.33E-01	1.87E-01
61	9.9318E-01	9.9190E-01	9.9499E-01	-1.28E-01	1.83E-01
62	9.9337E-01	9.9206E-01	9.9513E-01	-1.32E-01	1.77E-01
63	9.9333E-01	9.9203E-01	9.9506E-01	-1.31E-01	1.75E-01
64	9.9316E-01	9.9187E-01	9.9484E-01	-1.30E-01	1.69E-01
65	9.9287E-01	9.9148E-01	9.9447E-01	-1.40E-01	1.61E-01
66	9.9238E-01	9.9098E-01	9.9394E-01	-1.41E-01	1.57E-01
67	9.9180E-01	9.9037E-01	9.9329E-01	-1.43E-01	1.51E-01
68	9.9122E-01	9.8976E-01	9.9264E-01	-1.48E-01	1.43E-01
69	9.9072E-01	9.8916E-01	9.9207E-01	-1.57E-01	1.36E-01
70	9.9006E-01	9.8852E-01	9.9131E-01	-1.55E-01	1.27E-01
71	9.8904E-01	9.8748E-01	9.9018E-01	-1.57E-01	1.16E-01
72	9.8746E-01	9.8581E-01	9.8847E-01	-1.67E-01	1.02E-01
73	9.8518E-01	9.8343E-01	9.8597E-01	-1.78E-01	8.02E-02
74	9.8162E-01	9.7970E-01	9.8211E-01	-1.96E-01	4.96E-02
75	9.7603E-01	9.7393E-01	9.7612E-01	-2.15E-01	9.21E-03
76	9.6735E-01	9.6487E-01	9.6674E-01	-2.57E-01	-6.32E-02
77	9.5598E-01	9.5312E-01	9.5461E-01	-2.99E-01	-1.43E-01
78	9.4269E-01	9.3942E-01	9.4039E-01	-3.47E-01	-2.44E-01
79	9.2574E-01	9.2200E-01	9.2245E-01	-4.03E-01	-3.55E-01
80	9.0485E-01	9.0055E-01	9.0030E-01	-4.76E-01	-5.03E-01
81	8.7666E-01	8.7165E-01	8.7068E-01	-5.71E-01	-6.82E-01
82	8.4062E-01	8.3489E-01	8.3297E-01	-6.80E-01	-9.10E-01
83	7.9106E-01	7.8444E-01	7.8156E-01	-8.36E-01	-1.20E+00
84	7.2649E-01	7.1905E-01	7.1516E-01	-1.02E+00	-1.56E+00
85	6.4064E-01	6.3245E-01	6.2782E-01	-1.28E+00	-2.00E+00
86	5.2494E-01	5.1644E-01	5.1173E-01	-1.62E+00	-2.52E+00
87	3.9544E-01	3.8734E-01	3.8359E-01	-2.05E+00	-3.00E+00
88	2.8552E-01	2.7859E-01	2.7602E-01	-2.43E+00	-3.33E+00
89	1.9629E-01	1.9116E-01	1.8943E-01	-2.61E+00	-3.49E+00
90	1.2758E-01	1.2457E-01	1.2307E-01	-2.36E+00	-3.53E+00
91	8.2762E-02	8.1127E-02	7.9882E-02	-1.97E+00	-3.48E+00
92	5.6174E-02	5.5128E-02	5.4274E-02	-1.86E+00	-3.38E+00
93	4.2396E-02	4.1588E-02	4.1006E-02	-1.91E+00	-3.28E+00
94	3.5019E-02	3.4332E-02	3.3904E-02	-1.96E+00	-3.18E+00
95	3.0679E-02	3.0065E-02	2.9715E-02	-2.00E+00	-3.14E+00
96	2.7206E-02	2.6652E-02	2.6367E-02	-2.04E+00	-3.09E+00
97	2.2703E-02	2.2212E-02	2.2014E-02	-2.16E+00	-3.03E+00
98	1.7686E-02	1.7317E-02	1.7156E-02	-2.08E+00	-2.99E+00
99	1.1522E-02	1.1287E-02	1.1191E-02	-2.04E+00	-2.87E+00

Al_2O_3 - Gd_2O_3 (4 %) - ϕ grains = 376 µm

TABLEAU 15

RESULTAT DU CALCUL ROTH A 99 GROUPES - SORTIES A 4 GROUPES

CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ_1/ϕ_t	23.438	23.232	23.389	23.506	23.563	23.641	23.645	23.663	23.692	23.711	23.697	23.703	23.713	23.719	23.722
ϕ_2/ϕ_t	37.540	35.703	35.454	35.407	35.372	35.371	35.376	35.376	35.387	35.403	35.387	35.391	35.402	35.413	35.421
ϕ_3/ϕ_t	28.948	27.023	26.567	26.336	26.214	26.070	26.068	26.034	25.982	25.945	25.976	25.964	25.944	25.930	25.923
ϕ_4/ϕ_t	10.074	14.043	14.590	14.752	14.850	14.918	14.911	14.927	14.939	14.940	14.940	14.942	14.942	14.938	14.935
ϕ_3/ϕ_4	2.874	1.924	1.821	1.785	1.765	1.748	1.748	1.744	1.739	1.737	1.739	1.738	1.736	1.736	1.736
ϕ_4 (10^{-2})	3.9667	23.939	25.391	25.996	52.684	26.698	26.703	53.602	53.906	27.075	26.940	53.962	54.125	54.277	27 182
$\iint \nu\Sigma f\phi \, dEdr$ (10^{-3})	3.969	44.790	47.399	48.575	98.468	49.978	49.959	100.308	100.926	50.712	50.439	101.045	101.377	101.687	50 932
$\iint \Sigma a\phi \, dEdr$ (10^{-2})	2.42514	3.30317	3.46073	3.53246	7.14542	3.61921	3.61804	7.26068	7.30084	3.66706	3.64852	7.30799	7.33058	7.35205	3.68227
$\iint \Sigma f\phi \, dEdr$ (10^{-3})	1.5891	18.267	19.338	19.819	40.180	20.396	20.388	40.937	41.193	20.701	20.586	41.241	41.380	41 511	20 793

CONFIGURATION AVEC 1 UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (2 %)

TABLEAU 16

ECARTS EN % ENTRE LE CALCUL ROTH 5 GROUPES ET LE CALCUL
DE REFERENCE-SORTIES A 4 GROUPES

CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ_1/ϕ_t	0.051	0.009	-0.064	0.013	0.008	0.047	0.047	0.055	0.084	0.127	0.068	0.080	0.110	0.148	0.169
ϕ_2/ϕ_t	0.280	0.286	0.166	0.172	0.127	0.074	0.079	0.059	0.028	-0.006	0.025	0.014	-0.006	-0.023	-0.037
ϕ_3/ϕ_t	0.428	0.374	0.260	0.125	0.107	0.054	0.054	0.042	0.015	-0.012	0.031	0.023	0.	-0.035	-0.050
ϕ_4/ϕ_t	-2.382	-1.467	-0.768	-0.664	-0.498	-0.342	-0.355	-0.301	-0.228	-0.161	-0.228	-0.201	-0.167	-0.127	- 0.107
ϕ_3/ϕ_4	2.853	1.871	1.043	0.784	0.623	0.458	0.400	0.344	0.230	0.115	0.230	0.230	0.173	0.058	0.058
ϕ_4	-2.899	-1.980	-1.154	-0.942	-0.725	-0.412	-0.491	-0.410	-0.271	-0.144	-0.293	-0.250	-0.159	-0.066	-0.011
$\iint_V \Sigma f \phi \, dE dr$	2.530	-1.237	-1.152	-0.241	-0.225	-0.212	-0.224	-0.207	-0.155	-0.089	-0.178	-0.163	-0.106	-0.046	0.006
$\iint \Sigma a \phi \, dE dr$	-7.139	-1.028	-0.963	-0.265	-0.240	-0.208	-0.217	-0.194	-0.139	-0.073	-0.162	-0.139	-0.088	-0.032	0.006
$\iint \Sigma f \phi \, dE dr$	2.763	-1.150	-1.076	-0.161	-0.154	-0.152	-0.162	-0.122	-0.107	-0.053	-0.126	-0.109	-0.065	-0.017	0.014

TABLEAU 17
CONFIGURATION AVEC 1 UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (2 %)

ECARTS EN % ENTRE LE CALCUL ROTH 7 GROUPES ET LE CALCUL DE REFERENCE
SORTIES A 4 GROUPES

CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ_1/ϕ_t	-0.09	-0.09	-0.08	-0.05	-0.03	0.	0.	+0.02	+0.06	+0.10	+0.04	+0.05	+0.08	+0.12	+0.14
ϕ_2/ϕ_t	+0.09	+0.09	+0.06	+0.09	+0.07	+0.04	+0.04	+0.03	+0.01	-0.02	+0.01	-0.01	-0.02	-0.03	0.04
ϕ_3/ϕ_t	+0.11	+0.09	+0.09	+0.02	+0.02	+0.02	+0.02	+0.01	0.	0.	+0.02	+0.02	0.	-0.02	-0.04
ϕ_4/ϕ_t	-0.46	-0.26	-0.19	-0.18	-0.15	-0.13	-0.13	-0.12	-0.11	-0.09	-0.11	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07
ϕ_3/ϕ_4	+0.56	+0.36	+0.27	+0.22	+0.17	+0.11	+0.17	+0.11	+0.12	+0.06	+0.12	+0.12	+0.12	+0.06	0.
ϕ_4	-0.70	-0.50	-0.39	-0.34	-0.29	-0.16	-0.23	-0.21	-0.20	-0.10	-0.17	-0.20	-0.11	-0.06	-0.03
$\iint \nu\Sigma f\phi \, dEdr$	+0.75	-0.31	-0.23	-0.14	-0.13	-0.10	-0.10	-0.09	-0.06	-0.02	-0.07	-0.06	-0.03	+0.01	+0.03
$\iint \Sigma a\phi \, dEdr$	+0.65	-0.28	-0.22	-0.16	-0.15	-0.11	-0.11	-0.09	-0.06	-0.01	0.	-0.06	-0.02	+0.01	+0.04
$\iint \Sigma f\phi dEdr$	+0.90	-0.30	-0.20	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.	0.	-0.1	0	0.	0.	0.

TABLEAU 18

CONFIGURATION AVEC 1 UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (2 %)

ECARTS EN % ENTRE LE CALCUL ROTH 6 GROUPES ET LE CALCUL DE REFERENCE
SORTIES A 4 GROUPES

CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ_1/ϕ_t	-0.111	-0.073	-0.073	-0.034	-0.030	-0.008	0.008	0.017	0.051	0.089	0.034	0.051	0.076	0.114	0.135
ϕ_2/ϕ_t	0.045	0.104	0.068	0.096	0.074	0.040	0.045	0.031	0.006	-0.020	0.006	-0.006	-0.020	-0.034	-0.042
ϕ_3/ϕ_t	0.145	0.130	0.109	0.027	0.034	0.019	0.019	0.015	0.008	-0.004	0.023	0.019	0.	-0.023	-0.035
ϕ_4/ϕ_t	-0.328	-0.399	-0.247	-0.230	-0.189	-0.147	-0.154	-0.134	- 0.107	-0.074	-0.107	-0.094	-0.080	-0.060	-0.054
ϕ_3/ϕ_4	0.452	0.520	0.329	0.280	0.227	0.172	0.172	0.172	0.115	0.058	0.115	0.115	0.115	0.058	0.
ϕ_4	-0.522	-0.635	-0.449	-0.389	-0.325	-0.176	-0.247	-0.215	-0.148	-0.081	-0.167	-0.145	-0.092	-0.039	-0.004
$\iint_V \Sigma f \phi dE dr$	1.326	-0.277	-0.325	-0.080	-0.101	-0.086	-0.088	-0.088	-0.055	-0.022	-0.075	-0.064	-0.036	0.003	0.029
$\iint \Sigma a \phi dE dr$	0.861	-0.241	-0.287	-0.121	-0.126	-0.100	-0.101	-0.092	-0.059	-0.021	-0.075	-0.063	-0.031	0.006	0.031
$\iint \Sigma f \phi dE dr$	1.523	-0.181	-0.243	0.	-0.027	-0.025	-0.025	-0.027	-0.010	0.014	-0.024	-0.015	0.007	0.034	0.053

TABLEAU 19

CONFIGURATION AVEC 1 UO_2 (3 %) - Gd_2O_3 (2 %)

FLUX MOYEN DANS L'HETEROGENEITE

Configuration avec 1 crayon UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 200 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

		TCP en secondes	UC IBM 30 - 33	$\left(\frac{\overline{\phi Gd}}{\phi}\right)$ rap	$\left(\frac{\overline{\phi Gd}}{\phi}\right)$ th	$\frac{\overline{\Sigma a \phi Gd}}{\overline{\Sigma a \phi}}_{Comb.}$
Calcul de référence	MARSYAS	124	543	0.9643	0.6159	2.7984
Ecart par rapport à la référence $(\frac{X - réf.}{réf.})$ en %	NAUSICAA P1	47	138	-0.5	-0.3	-0.7
	NAUSICAA PO	15	50	-1.5	-1.6	-2.0
	EURYDICE DP-1	52	175	0.0	+2.2	+1.8
	EURYDICE DP-0	10	36	-0.9	+1.3	+1.0
	EURYDICE ROTHx4	9	31	-1.3	-0.5	-0.6
	ROTH	6	24	-3.8	-3.2	-3.3

FLUX MOYEN DANS L'HETEROGENEITE

Configuration avec 1 crayon UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 300 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

		TCP en secondes	UC IBM 30 - 33	$\left(\frac{\overline{\phi Gd}}{\phi}\right)$ rap	$\left(\frac{\overline{\phi Gd}}{\phi}\right)$ th	$\frac{\overline{\Sigma a \phi Gd}}{\overline{\Sigma a \phi}}_{Comb.}$
Calcul de référence	MARSYAS	127	553	0.9661	0.5987	2.9420
Ecart par rapport à la référence $(\frac{X - réf.}{réf.})$ en %	NAUSICAA P1	47	138	-0.4	-0.4	-0.6
	NAUSICAA PO	15	49	-1.4	-1.7	-2.1
	EURYDICE DP-1	59	174	+0.1	+2.4	+1.8
	EURYDICE DP-0	10	37	-0.7	+1.3	+1.0
	EURYDICE ROTHx4	9	28	-1.2	-0.6	-0.6
	ROTH	6	24	-3.5	-3.5	-3.5

TABLEAU 20

TAUX DE FISSION PAR CELLULE

Numéro cellule	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MARSYAS	0.3212	0.8982	0.9419	0.9656	0.9756	0.9871	0.9905	0.9913	0.9949	1	0.9951	0.9956	0.9977	1	1*
NAUSICAA P1	0.	+0.4	+0.8	+0.3	+0.1	0.	-0.2	0.	0.	-0.3	0.	0.	0.	-0.1	0.
NAUSICAA PO	-1.4	-0.7	-0.3	-0.3	-0.4	-0.2	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.
EURYDICE DP-1	+0.7	+0.9	+0.8	0.	0.	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.
EURYDICE DP-0	-0.3	0.	-0.2	-0.5	-0.5	-0.3	-0.7	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.
EURYDICE ROTHx4	-1.2	-1.0	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4	-0.8	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	0.
ROTH	-4.	-2.5	-1.5	-1.4	-1.1	-0.7	-1.1	-0.8	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0.

* Normalisation à 1 sur la cellule la moins perturbée.

Configuration avec un crayon UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 200 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

TAUX DE FISSION PAR CELLULE

Numéro cellule	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MARSYAS	0.4642	0.8939	0.9389	0.9637	0.9740	0.9862	0.9897	0.9906	0.9944	1.	0.9947	0.9952	0.9975	1	1*
NAUSICAA P1	-0.2	+0.5	+0.9	+0.3	+0.2	0.0	-0.2	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.
NAUSICAA PO	-1.6	-0.7	-0.4	-0.3	-0.4	-0.2	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.
EURYDICE DP-1	+0.6	+0.9	+0.8	-0.1	0.	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.
EURYDICE DP-0	-0.4	+0.1	-0.2	-0.5	-0.5	-0.4	-0.7	-0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0.
EURYDICE ROTHx4	-1.3	-1.0	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4	-0.8	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	0.
ROTH	-4.0	-2.6	-1.5	-1.4	-1.1	-0.8	-1.1	-0.8	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0.

* Normalisation à 1 sur la cellule la moins perturbée.

Configuration avec un crayon UO_2 - Gd_2O_3 (5,1 % en ^{235}U, 300 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

TABLEAU 21

COMPARAISON DES TAUX DE FISSION PAR CELLULE
A 99 GROUPES ET A 7 GROUPES

CELLULES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TAUX DE FISSION 7 GROUPES	0.4098	0.7628	0.8123	0.7783	0.8282	0.4367	0.8117	0.8773	0.9203	1. *
TAUX DE FISSION 99 GROUPES	0.4079	0.7680	0.8171	0.7849	0.8324	0.4334	0.8153	0.8791	0.9215	1. *
ECART $\frac{7 - 99}{99}$ %	+ 0.5	- 0.7	- 0.6	- 0.6	- 0.5	+ 0.8	- 0.4	- 0.2	- 0.1	0.

* Normé sur la cellule la moins perturbée

CONFIGURATION AVEC 9 CRAYONS UO_2 - Gd_2O_3 (5.1 % en ^{235}U, 300 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

TABLEAU 22

				CELLULE 1			CELLULE 6		
		TCP en sec.	UC IBM 30-33	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{rap}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{th}$	$\frac{\Sigma a\bar{\phi}}{\Sigma a\phi Comb}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{rap}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{th}$	$\frac{\Sigma a\overline{\phi\ Gd}}{\Sigma a\phi Comb}$
REFERENCE	NAUSICAA PO Option mélange	18	61	0.8845	0.5783	2.5711	0.9277	0.6094	2.7213
ECART PAR RAPPORT A LA REFERENCE $(\frac{X - réf.}{réf.})$ en %	EURYDICE DP-0 Option mélange	9	33	+ 1.0	+ 1.9	+ 1.9	+ 0.6	+ 0.9	+ 1.0
	EURYDICE ROTHx4	8	26	- 0.7	- 0.5	- 0.4	- 0.2	- 1.0	- 0.6
	ROTH	5	19	- 5.4	- 4.9	- 4.7	- 2.6	- 3.2	- 2.9

Configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 200 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

				CELLULE 1			CELLULE 6		
		TCP en sec.	UC IBM 30-33	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{rap}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{th}$	$\frac{\Sigma a\bar{\phi}}{\Sigma a\phi Comb}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{rap}$	$\left(\frac{\bar{\phi}\ Gd}{\bar{\phi}}\right)_{th}$	$\frac{\Sigma a\overline{\phi\ Gd}}{\Sigma a\phi Comb}$
REFERENCE	NAUSICAA PO Option mélange	18	60	0.8887	0.5592	2.6960	0.9311	0.5916	2.8591
ECART PAR RAPPORT A LA REFERENCE $(\frac{X - réf.}{réf.})$ en %	EURYDICE DP-0 Option mélange	8	31	+ 0.4	+ 1.4	+ 1.4	+ 0.5	+ 1.4	+ 1.4
	EURYDICE ROTHx4	8	27	- 0.7	- 0.5	- 0.3	- 0.2	- 1.0	- 0.6
	ROTH	5	19	- 5.2	- 5.0	- 4.7	- 2.4	- 3.4	- 3.0

Configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 300 mg/cm^3 en Gd_2O_3)

TABLEAU 23

TAUX DE FISSION PAR CELLULE

	CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Calcul de référence	NAUSICAA P0*	0.2994	0.8018	0.8397	0.8126	0.8516	0.3122	0.8406	0.8940	0.9285	1.**
ECART PAR RAPPORT A LA REFERENCE $(\frac{X - Réf.}{Réf.})$ en %	EURYDICE DP-0*	+ 1.2	+ 0.7	+ 0.5	+ 0.3	- 0.2	+ 0.4	- 0.5	- 0.4	- 0.2	0.
	EURYDICE ROTHx4	- 0.9	- 1.1	- 0.7	- 1.3	- 1.1	- 0.9	- 1.8	- 1.4	- 0.6	0.
	ROTH	- 5.6	- 3.9	- 2.6	- 3.3	- 2.0	- 3.4	- 2.6	- 1.4	- 0.6	0.

* Option mélange
** Normé sur la cellule la moins perturbée

Configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 (3 % en ^{235}U, 200 mg/cm^3)

	CELLULE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Calcul de référence	NAUSICAA P0*	0.4337	0.7933	0.8322	0.8045	0.8445	0.4517	0.8340	0.8900	0.9254	1.**
ECART PAR RAPPORT A LA REFERENCE $(\frac{X - Réf.}{Réf.})$ en %	EURYDICE DP-0*	+ 0.7	+ 0.6	+ 0.5	+ 0.6	+ 0.6	+ 0.7	+ 0.4	+ 0.5	+ 0.1	0.
	EURYDICE ROTHx4	- 0.9	- 1.1	- 0.7	- 1.3	- 1.1	- 0.8	- 1.8	- 1.4	- 0.6	0.
	ROTH	- 5.5	- 3.8	- 2.4	- 3.3	- 1.9	- 3.3	- 2.7	- 1.4	- 0.6	0.

* Option mélange
** Normé sur la cellule la moins perturbée

Configuration avec 9 crayons UO_2 - Gd_2O_3 (5,1 % en ^{235}U, 300 mg/cm^3)

TABLEAU 24

ECHANTILLONS		S Mesure brute	S' correction 1	S" S'-réf	$S^{(N)}$	Effet de bout
1 Al_2O_3 - Gd_2O_3 (1 %)	+ 12 Al_2O_3	-10701	-10775	-8365	-8365	33,4±2,8
3	+ 10 Al_2O_3	-23100	-23322	-20912	-6982	11,3±1,2
5	+ 8 Al_2O_3	-34656	-35026	-32616	-6553	4,5±1,0
7	+ 6 Al_2O_3	-46267	-46785	-44375	-6397	2,0±0,9
1 Al_2O_3 - Gd_2O_3(4 %)	+ 12 Al_2O_3	-13116	-13190	-10780	-10780	37,0±2,2
3	+ 10 Al_2O_3	-28590	-28812	-26402	-8815	12,0±1,0
5	+ 8 Al_2O_3	-43206	-43576	-41166	-8271	5,1±0,8
7	+ 6 Al_2O_3	-57584	-58102	-55692	-8028	2,0±0,7
1 Al_2O_3 - Gd_2O_3(8 %)	+ 12 Al_2O_3	-14352	-14426	-12016	-12016	39,6±2,0
3	+ 10 Al_2O_3	-30913	-31135	-28725	-9591	11,4±0,9
5	+ 8 Al_2O_3	-46954	-47324	-44914	-9024	5,1±0,8
7	+ 6 Al_2O_3	-62798	-63316	-60906	-8780	2,0±0,6
13 Al 0		-2410	-2410	0	0	0

TABLEAU 25

ECHANTILLONS	Teneur en Gd_2O_3		Signaux bruts	Signaux corrigés de taille (H = 36 mm)	Signaux corrigés d'effet de bout	Mesures normalisées (à H = 40 mm)	Calcul ROTH X 4	$\frac{C - E}{E}$ en %
	en %	mg/cm^3						
D1 - D9	1.02 ± 0.02	39.5	20920 ± 170*	20920 ± 180**	18850	20940 ± 180**	21970	+4.9 ± 1.0***
D2 - D9	2.12 ± 0.10	82.9	23890 ± 170	23890 ± 180	21520	23910 ± 180	24900	+4.1 ± 1.1
D3 - D9	4.20 ± 0.05	167.0	26600 ± 170	26600 ± 180	23960	26630 ± 180	27380	+2.8 ± 0.7
D4 - D9	7.80 ± 0.25	317.0	29450 ± 170	29450 ± 180	26530	29480 ± 180	29620	+0.5 ± 0.8
D5 - D9	12.00 ± 0.10	500.0	31170 ± 170	31170 ± 180	28080	31200 ± 180	31330	+0.4 ± 0.6
D6 - D9	16.10 ± 0.15	689.0	32260 ± 170	32260 ± 180	29060	32290 ± 180	32570	+0.9 ± 0.6
D7 - D9	22.02 ± 0.20	1000.0	33400 ± 170	34220 ± 200	30830	34250 ± 200	34100	-0.4 ± 0.6
D8 - D9	39.87 ± 0.20	2060.0	36600 ± 170	37500 ± 200	33780	37540 ± 200	37920	+1.0 ± 0.5

* Ecarts-type liés aux imprécisions statistiques et aux erreurs de reproductibilité.

** Ecarts-type correspondant aux erreurs aléatoires : erreurs précédentes de comptage combinées aux incertitudes liées à la taille des pastilles.

*** Intervalle de confiance (à 1σ) correspondant aux incertitudes de type aléatoire : incertitudes de mesures type ** combinées avec l'incertitude sur la teneur en Gd_2O_3 des échantillons.

TABLEAU 26

ECHANTILLON	Teneur en Gd_2O_3		GD 155		GD 156		GD 157		GD 158		GD 160		TOTAL	
	en %	en mg/cm^3	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique
D1	1.02	39,5	0.69	17.69	0.09	0.006	0.33	81.11	0.083	0.003	0.0015	0.0007	1.19	98.81
D2	2.12	82,9	1.24	17.51	0.16	0.007	0.59	80.33	0.150	0.0036	0.0027	0.0009	2.14	97.86
D3	4.20	167	2.15	17.26	0.28	0.008	1.03	79.00	0.266	0.0045	0.005	0.0010	3.73	96.27
D4	7.80	317	3.59	16.85	0.50	0.011	1.74	76.82	0.4666	0.0057	0.009	0.0013	6.31	93.69
D5	12.00	500	4.76	16.50	0.71	0.012	2.36	74.98	0.658	0.0065	0.012	0.0015	8.50	91.50
D6	16.10	689	6.01	16.11	0.94	0.013	3.04	73.00	0.865	0.007	0.016	0.0017	10.87	89.13
D7	22.02	1000	7.57	15.60	1.27	0.015	3.93	70.44	1.15	0.008	0.022	0.0018	13.94	86.06
D8	39.87	2060	11.20	14.30	2.18	0.02	6.19	64.13	1.93	0.01	0.038	0.002	21.54	78.46

REPARTITION DU TAUX DE CAPTURE DU GADOLINIUM ENTRE SES DIFFERENTS ISOTOPES

TABLEAU 27

ECHANTILLON	Teneur en Gd_2O_3		GD 155		GD 156		GD 157		GD 158		GD 160	
	en %	en mg^3/cm^3	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique	Rapide	Thermique
D1	1.02	39,5	3.764	96.236	94.164	5.836	0.401	99.599	96.621	3.379	68.444	31.556
D2	2.12	82,9	6.624	93.376	95.934	4.066	0.730	99.270	97.652	2.348	76.027	23.973
D3	4.20	167	11.061	88.939	97.101	2.899	1.283	98.717	98.321	1.679	81.848	18.152
D4	7.80	317	17.585	82.415	97.928	2.072	2.218	97.782	98.792	1.208	86.475	13.525
D5	12.00	500	22.383	77.617	98.325	1.675	3.054	96.946	99.016	0.984	88.869	11.131
D6	16.10	689	27.162	72.838	98.599	1.401	3.996	96.004	99.170	0.830	90.597	9.403
D7	22.02	1000	32.674	67.326	98.849	1.151	5.283	94.717	99.311	0.689	92.244	7.756
D8	39.87	2060	43.917	56.083	99.234	0.766	8.799	91.201	99.530	0.470	94.916	5.084

CONTRIBUTION EN POUR-CENTS DES DOMAINES THERMIQUE ET EPITHERMIQUE DANS
LE TAUX D'ABSORPTION DE CHAQUE ISOTOPE DU GADOLINIUM

TABLEAU 28

ECHANTILLON	TENEUR EN Gd_2O_3 (%)	CALCUL ROTHx4	CALCUL ROTH	$\frac{ROTHx4-ROTH}{ROTH}$ (%)
D0 - D9	0.3	-2.52992 E-2	-2.52061 E-2	+ 0.37
D1 - D9	1.02	-3.78898 E-2	-3.75750 E-2	+ 0.83
D2 - D9	2.12	-4.33660 E-2	-4.29259 E-2	+ 1.01
D3 - D9	4.20	-4.75211 E-2	-4.69771 E-2	+ 1.15
D4 - D9	7.80	-5.14021 E-2	-5.07598 E-2	+ 1.26
D5 - D9	12.00	-5.38712 E-2	-5.31632 E-2	+ 1.31
D6 - D9	16.10	-5.60780 E-2	-5.53119 E-2	+ 1.37
D7 - D9	22.02	-5.86670 E-2	-5.78303 E-2	+ 1.43
D8 - D9	39.87	-6.45840 E-2	-6.35711 E-2	+ 1.57

EFFET DU NIVEAU DE FLUX SUR LES EFFETS
EN REACTIVITE CALCULES

TABLEAU 29

Définition des échantillons		MESURES BRUTES	MESURES CORRIGEES D'EFFET DE BOUT	CALCUL	$\frac{C - E}{E}$ en %
Teneur en Gd	e_{235} en %				
0.5 % ± 0.01	2	22550 ± 280*	20790	21730	+4.5 ± 1.4**
50 mg/cm3	3	21820 ± 280	20110	21100	+4.9 ± 1.4
1.0 % ± 0.02	0.719	26410 ± 280	24340	25340	+4.1 ± 1.1
	2	25870 ± 260	23840	24590	+3.1 ± 1.1
100 mg/cm3	3	24760 ± 280	22820	24030	+5.3 ± 1.1
2.0 % ± 0.03	0.719	29760 ± 280	27430	27640	+0.8 ± 1.0
200 mg/cm3	3	28330 ± 280	26110	26750	+2.4 ± 1.0
3.0 % ± 0.04	0.719	31030 ± 280	28600	29040	+1.5 ± 1.0
300 mg/cm3	3	29520 ± 260	27210	28270	+3.9 ± 0.9

* Ecart-type prenant en compte l'incertitude statistique et les erreurs de reproductibilité.

** Intervalle de confiance (à 1σ) correspondant aux erreurs aléatoires : incertitude de mesure combinée à l'incertitude liée à la teneur en gadolinium.

TABLEAU 30

ECHANTILLONS		MESURES BRUTES	MESURES CORRIGEES DE L'EFFET DE BOUT	MESURES NORMALISEES (H = 40 mm)	CALCUL	$\frac{C - E}{E}$ en %
ϕ grains (microns)	$\frac{Gd_2O_3}{Al_2O_3 + Gd_2O_3}$ en %					
198 ± 20	1.79 ± 0.05	13330 ± 170	12340	13710 ± 170	13130	- 4.2 ± 6.0*
	3.71 ± 0.12	18270 ± 170	16920	18800 ± 170	20120	+ 7.0 ± 3.7
	8.42 ± 0.27	24960 ± 170	23110	25680 ± 170	27500	+ 7.0 ± 2.0
376 ± 40	2.05 ± 0.06	9600 ± 170	8970	9970 ± 170	9880	- 0.9 ± 8.8
	4.20 ± 0.17	14880 ± 170	13910	15460 ± 170	16400	+ 6.1 ± 7.5
	7.58 ± 0.24	21240 ± 170	19850	22050 ± 170	22690	+ 2.9 ± 3.8

* Intervalle de confiance (à 1σ) combinant quadratiquement l'écart-type des erreurs de mesures aux incertitudes sur la taille des grains et la teneur en Gd_2O_3.

TABLEAU 31

ECHANTILLON	DIAMETRE DES GRAINS (µm)	SIGNAUX BRUTS	SIGNAUX CORRIGES DE L'EFFET DE BOUT	SIGNAUX NORMALISES (H = 40 mm)*	CALCUL	$\frac{C - E}{E}$ en %
A1 - C8	0.	32040 ± 280	29670	26710	26530	- 0.6 ± 1.2**
A2 - C8	80 ± 10	27880 ± 280	26060	23460	24550	+ 4.6 ± 1.7
A3 - C8	120 ± 9	27530 ± 280	25850	23270	23420	+ 0.6 ± 1.7
A4 - C8	195 ± 10	24880 ± 280	23470	21130	21300	+ 0.8 ± 2.0
A5 - C8	380 ± 19	20390 ± 280	19330	17400	16980	- 2.4 ± 3.2

* Les échantillons sont constitués de 4 pastilles de hauteur de 11.1 mm ; on a donc effectué une correction de longueur pour ramener les échantillons à 40,0 mm.

** Ecart-type combinant les incertitudes de mesures et les incertitudes sur la teneur et la taille des grains de Gd_2O_3 dans l'échantillon.

TABLEAU 32

CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS D'OSCILLATIONS UO_2 - Gd_2O_3 Série E

ECHANTILLONS	Masse Etui+Bouchons (g)	Masse cale tubulaire (g)	Masse contenu (g)	Masse totale (g)
E1	6.4480	0.4301	20.7720	27.6501
E2	6.4480	0.4301	20.7877	27.6658
E3	6.4480	0.4301	20.7549	27.6330
E4	6.4480	0.4301	20.6806	27.5587
E5	6.4480	0.4301	20.8330	27.7111
E6	6.4480	0.4301	20.7661	27.6442
E7	6.4480	0.4301	20.9255	27.8036

TABLEAU 33

DENOMI-NATION	COURONNE INTERNE		COURONNE EXTERNE		MESURES BRUTES	MESURES CORRIGEES DE L'EFFET DE BOUT	CALCUL	$\frac{C - E}{E}$ en %
	e_{235} %	Gd %	e_{235} %	Gd %				
E1	3	1	2	1	25180 ± 260	23210	24510	+5.6 ± 1.2 *
E2	3	1	2	0.5	23750 ± 280	21890	22820	+4.2 ± 1.3
E3	3	1	3	1	25020 ± 280	23060	24160	+4.8 ± 1.3
E4	3	1	3	0.5	23350 ± 280	21520	22450	+4.3 ± 1.3
E5	2	1	2	1	26080 ± 260	24040	24680	+2.7 ± 1.2
E6	2	1	2	0.5	24180 ± 260	22290	23010	+3.2 ± 1.2
E7	2	0.5	2	0.5	22590 ± 260	20820	21810	+4.8 ± 1.2

* Intervalle de confiance (à 1σ) correspondant aux erreurs aléatoires : incertitudes de mesures combinées à l'incertitude sur la charge en gadolinium.

TABLEAU 34

ECHANTILLON	EXPERIENCE	CALCUL	$\frac{C - E}{E}$ en %
E3 - C8	- 23060	- 24160	+ 4.77
C10 - C8	- 22820	- 24030	+ 5.30
E5 - C8	- 24040	- 24680	+ 2.66
C7 - C8	- 23840	- 24590	+ 3.10
E7 - C8	- 20820	- 21810	+ 4.76
C6 - C8	- 20790	- 21730	+ 4.50

COMPARAISON EXPERIENCE-CALCUL ENTRE LES ECHANTILLONS

UO_2 - Gd_2O_3 A STRUCTURE HOMOGENE (SERIE C)

ET A STRUCTURE HETEROGENE (SERIE E)

TABLEAU 35

ECHANTILLON	ABSORPTION DE LA ZONE INTERIEURE (%)	ABSORPTION DE LA ZONE EXTERIEURE (%)
E1	23.34	76.66
E2	34.55	65.45
E3	23.04	76.96
E4	33.51	66.49
E5	22.61	77.39
E6	33.87	66.13
E7	29.87	70.13

TABLEAU 36

Réseau type PWR		Réseau Gédéon	
Pas	12,6 mm	Pas	11,4 mm
Combustible	Ø 8.19 mm	Combustible	Ø 8.05 mm
Gaine Zircaloy	$Ø_{ext.}$ 9.6mm	Gaine Zircaloy	$Ø_{ext.}$ 9.4 mm
Densité modérateur	0.72	Densité modérateur	1.
Rapport $\frac{V_{H_2O} \times 0.72}{V_{Combust.}}$	= 1.19	Rapport $\frac{V_{H_2O}}{V_{Comb}}$	= 1.19
Enrichissement en ^{235}U	3.25 %	Enrichissement en ^{235}U	3.25 %

TABLEAU 37

		RESEAU PWR	RESEAU GEDEON	
MODERATEUR	TEMPERATURE	300ºC	20ºC	300ºC
	DENSITE	0.72	1	1
$\frac{\phi_i}{\phi_t}$	$\frac{\phi_1}{\phi t}$ (%)	24.36	24.93	24.41
	$\frac{\phi_2}{\phi t}$ (%)	36.91	37.59	36.83
	$\frac{\phi_3}{\phi t}$ (%)	25.40	25.96	25.52
	$\frac{\phi_4}{\phi t}$ (%)	13.34	11.52	13.24

$$\emptyset_t = \sum_{i=1}^{4} \emptyset_i$$

TABLEAU 38

		RESEAU PWR	RESEAU GEDEON	
MODERATEUR	Température	300ºC	20ºC	300ºC
	Densité	0.72	1	1
σf_5^3		23,571	23,636	23,681
σf_5^4		270,72	327,94	274,18
σa_5^3		35,890	36,063	36,104
σa_5^4		318,64	384,36	322,57
σa_8^3		2,2762	2,0225	2,0206
σa_8^4		1,4101	1,6513	1,4256

TABLEAU 39

	Cellule 12 UA1	Cellule 11 UA1	Cellule 10 UA1	Cellule 9 UO_2	Cellule 8 UO_2	Cellule 4 UO_2	Cellule 1 UO_2	Cellule 2 UO_2	Cellule 6 UO_2	Cellul UO_2
$\frac{\phi\ 1}{\phi}$ (%)	25,95	25,89	25,45	26,63	26,25	25,81	25,60	25,52	25,49	25,
$\frac{\phi\ 2}{\phi}$ (%)	28,94	30,25	30,96	35,15	36,97	37,64	37,81	37,82	37,79	37,
$\frac{\phi\ 3}{\phi}$ (%)	21,99	24,04	24,87	24,12	24,47	24,92	25,15	25,25	25,29	25,
$\frac{\phi\ 4}{\phi}$ (%)	23,11	19,83	18,72	14,09	12,31	11,63	11,45	11,41	11,44	11,

Traverse de spectre - Réseau UO_2 sans Gd

Taux de combustion de la zone nourricière : 10,2 %

	Cellule 12 UA1	Cellule 11 UA1	Cellule 10 UA1	Cellule 9 UO_2	Cellule 8 UO_2	Cellule 4 UO_2	Cellule 1 UO_2	Cellule 2 UO_2	Cellule 6 UO_2	Cellul UO_2
$\frac{\phi\ 1}{\phi}$ (%)	24,59	24,68	24,42	26,75	26,62	26,20	25,97	25,89	25,85	25,
$\frac{\phi\ 2}{\phi}$ (%)	27,59	28,98	29,97	34,92	37,03	37,80	38,00	38,01	37,97	37,
$\frac{\phi\ 3}{\phi}$ (%)	21,41	23,48	24,44	23,60	24,03	24,56	24,83	24,93	24,98	25,
$\frac{\phi\ 4}{\phi}$ (%)	26,41	22,86	21,17	14,72	12,32	11,44	11,21	11,17	11,19	11,

Traverse de spectre - Réseau UO_2 sans Gd

Taux de combustion de la zone nourricière : 31 %

	Cellule 12 UA1	Cellule 11 UA1	Cellule 10 UA1	Cellule 9 UO_2	Cellule 8 UO_2	Cellule 4 UO_2	Cellule 1 UO_2	Cellule 2 UO_2	Cellule 6 UO_2	Cellule UO_2
$\frac{\phi\ 1}{\phi}$ (%)	23,49	23,68	23,61	26,88	26,92	26,51	26,28	26,19	26,15	26,
$\frac{\phi\ 2}{\phi}$ (%)	26,48	27,95	29,20	34,79	37,11	37,95	38,15	38,17	38,13	38,
$\frac{\phi\ 3}{\phi}$ (%)	20,90	23,01	24,10	23,20	23,70	24,28	24,58	24,69	24,74	24,
$\frac{\phi\ 4}{\phi}$ (%)	29,13	25,36	23,10	15,13	12,27	11,26	10,99	10,95	10,98	10,

$$\phi = \sum_{i=1}^{4} \phi i$$

Traverse de spectre - Réseau UO_2 sans Gd

Taux de combustion de la zone nourricière : 44 %

TABLEAU 40

CELLULES	1 UO_2 Gd_2O_3(8%)	2 UO_2	3 UO_2	4 UO_2	5 UO_2
$\frac{\phi_1}{\phi t}$ (%)	24.89	24.50	24.60	24.78	24.91
$\frac{\phi_2}{\phi t}$ (%)	40.28	38.15	37.79	37.63	37.59
$\frac{\phi_3}{\phi t}$ (%)	28.38	26.94	26.61	26.28	26.08
$\frac{\phi_4}{\phi t}$ (%)	6.44	10.41	11.01	11.30	11.42

$$\phi t = \sum_{i=1,4} \phi_i$$

GEOMETRIE MULTICELLULES

				5
			5	5
		4	5	5
	3	4	5	5
1	2	4	5	5

TABLEAU 41

	Cellule 12 UA1	Cellule 11 UA1	Cellule 10 UA1	Cellule 9 UO_2	Cellule 8 UO_2	Cellule 4 UO_2	Cellule 1 UO_2	Cellule 2 UO_2	Cellule 6 UO_2	Cellule 7 UO_2
$\frac{\phi_1}{\phi}$ (%)	26,25	24,72	23,43	26,57	26,65	26,26	26,03	25,94	25,89	25,83
$\frac{\phi_2}{\phi}$ (%)	28,79	29,02	29,22	34,60	36,92	37,78	38,00	38,02	37,98	38,00
$\frac{\phi_3}{\phi}$ (%)	21,36	23,47	24,46	23,47	23,90	24,45	24,74	24,86	24,91	24,99
$\frac{\phi_4}{\phi}$ (%)	23,60	22,80	22,89	15,36	12,54	11,51	11,23	11,18	11,21	11,18

Traverse de spectre - Réseau UO_2 sans Gd

Taux de combustion moyen dans la zone nourricière

	Cellule 12 UA1	Cellule 11 UA1	Cellule 10 UA1	Cellule 9 UO_2	Cellule 8 UO_2	Cellule 4 UO_2	Cellule 1 UO_2 Gd_2O_3	Cellule 2 UO_2	Cellule 6 UO_2	Cellule 7 UO_2
$\frac{\phi_1}{\phi}$ (%)	26,39	24,86	23,56	26,66	26,66	25,99	26,19	25,62	25,80	25,82
$\frac{\phi_2}{\phi}$ (%)	28,88	29,10	29,27	34,54	36,91	38,33	40,62	38,57	38,01	37,97
$\frac{\phi_3}{\phi}$ (%)	21,30	23,41	24,39	23,44	24,00	25,24	26,98	25,71	25,16	25,10
$\frac{\phi_4}{\phi}$ (%)	23,43	22,63	22,79	15,36	12,44	10,44	6,21	10,10	11,03	11,11

$$\phi = \sum_{i=1}^{4} \phi_i$$

Traverse de spectre - Réseau UO_2 avec 4 UO_2 - Gd_2O_3 (8 %)

Taux de combustion moyen dans la zone nourricière

TABLEAU 42

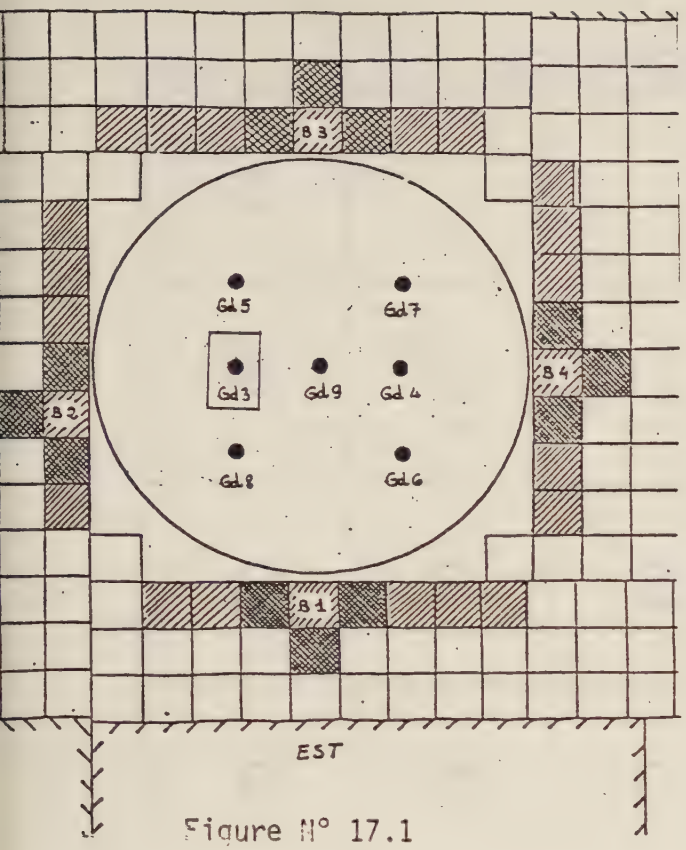


Figure N° 17.1

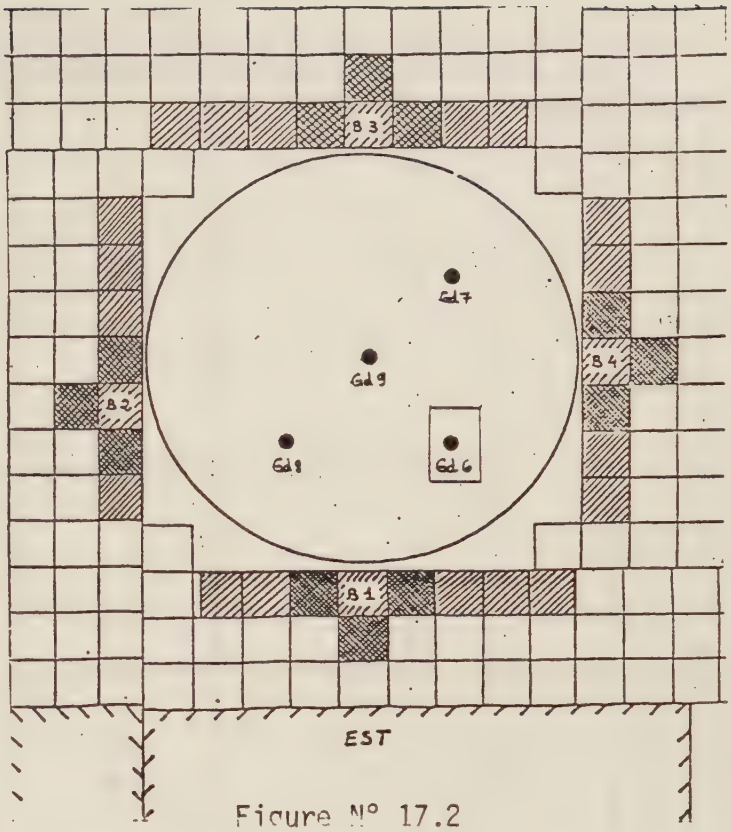


Figure N° 17.2

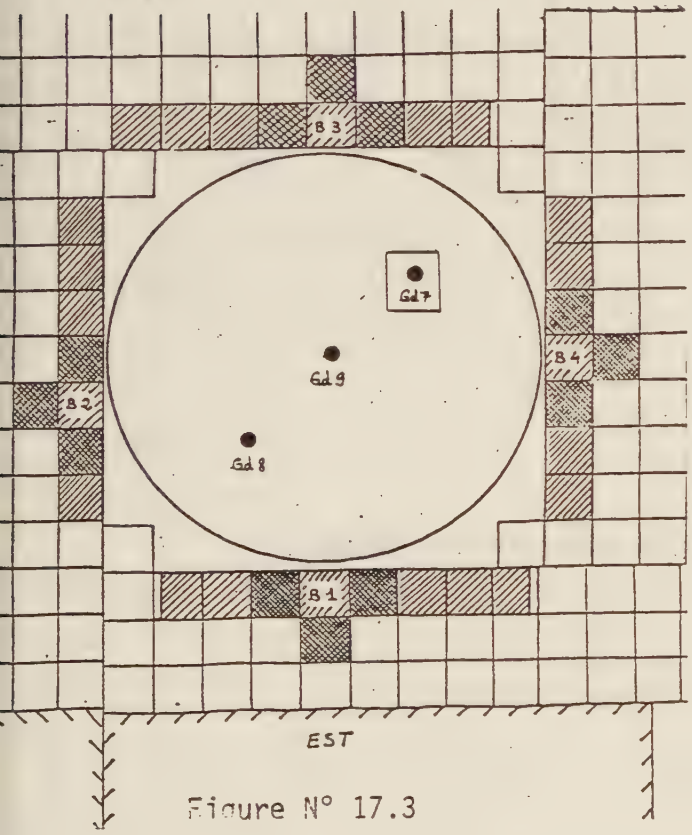


Figure N° 17.3

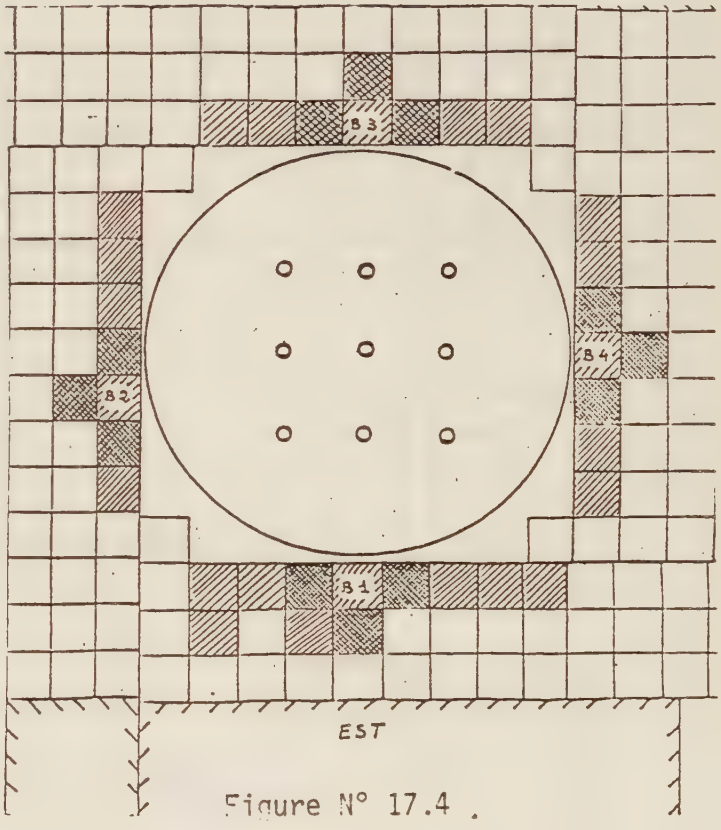
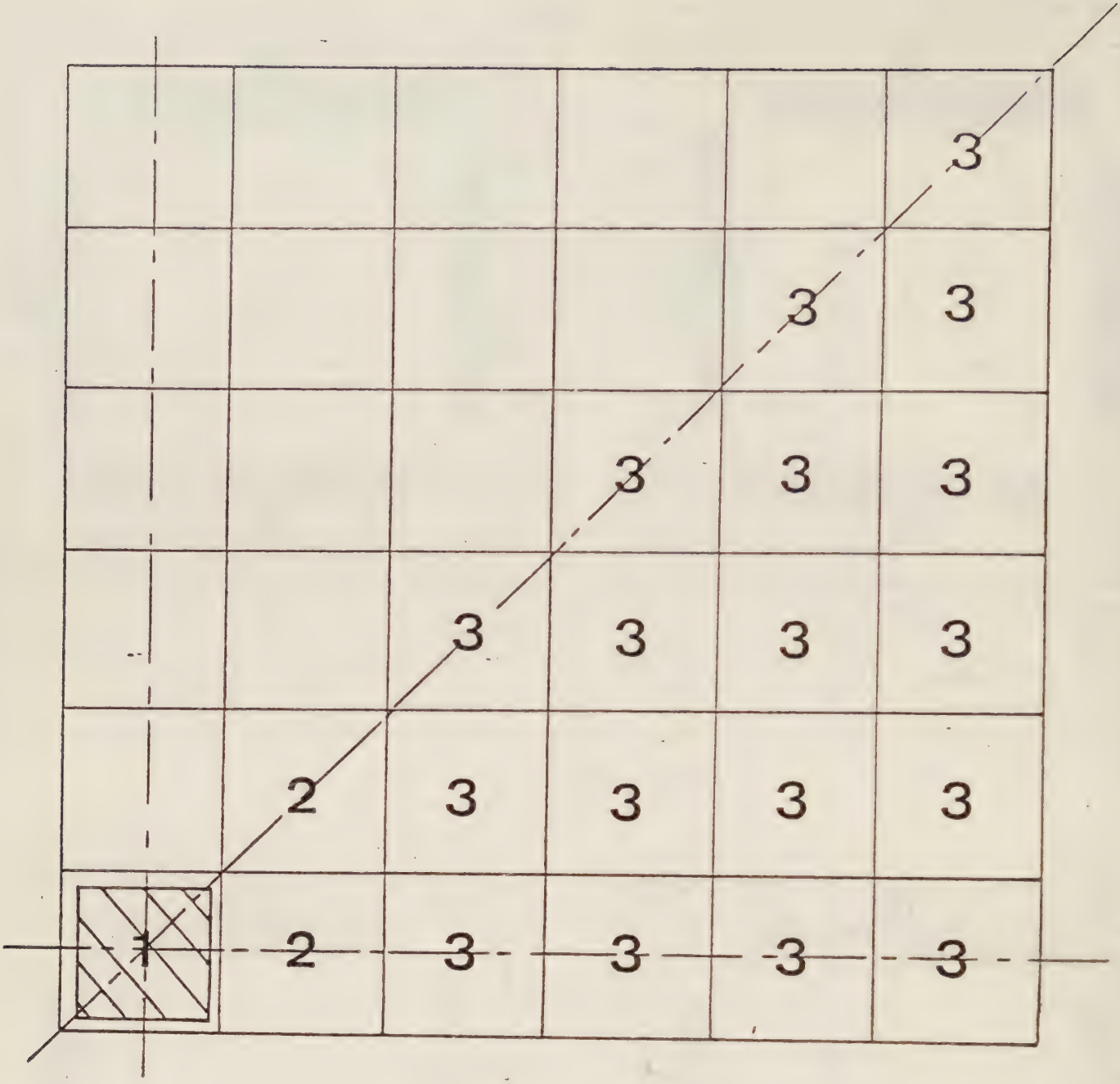
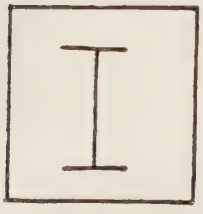


Figure N° 17.4

Figure N° 17





I = numéro de la cellule génératrice combustible.

cellule UO_2 - Gd_2O_3

FIGURE N° 18

DISTRIBUTION DU FLUX SCALAIRE

A L INTERIEUR DU CRAYON U02-GD203

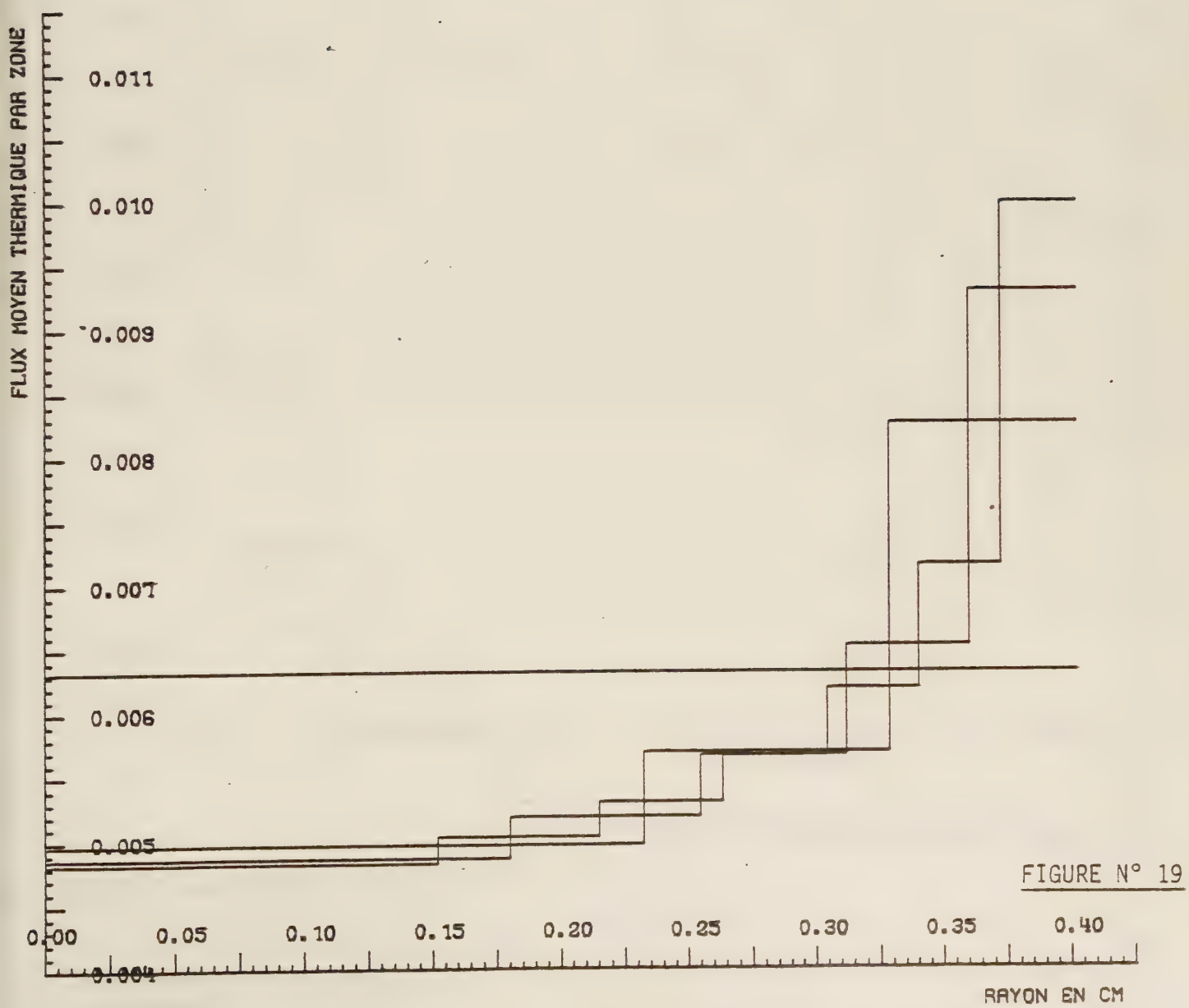


FIGURE N° 19

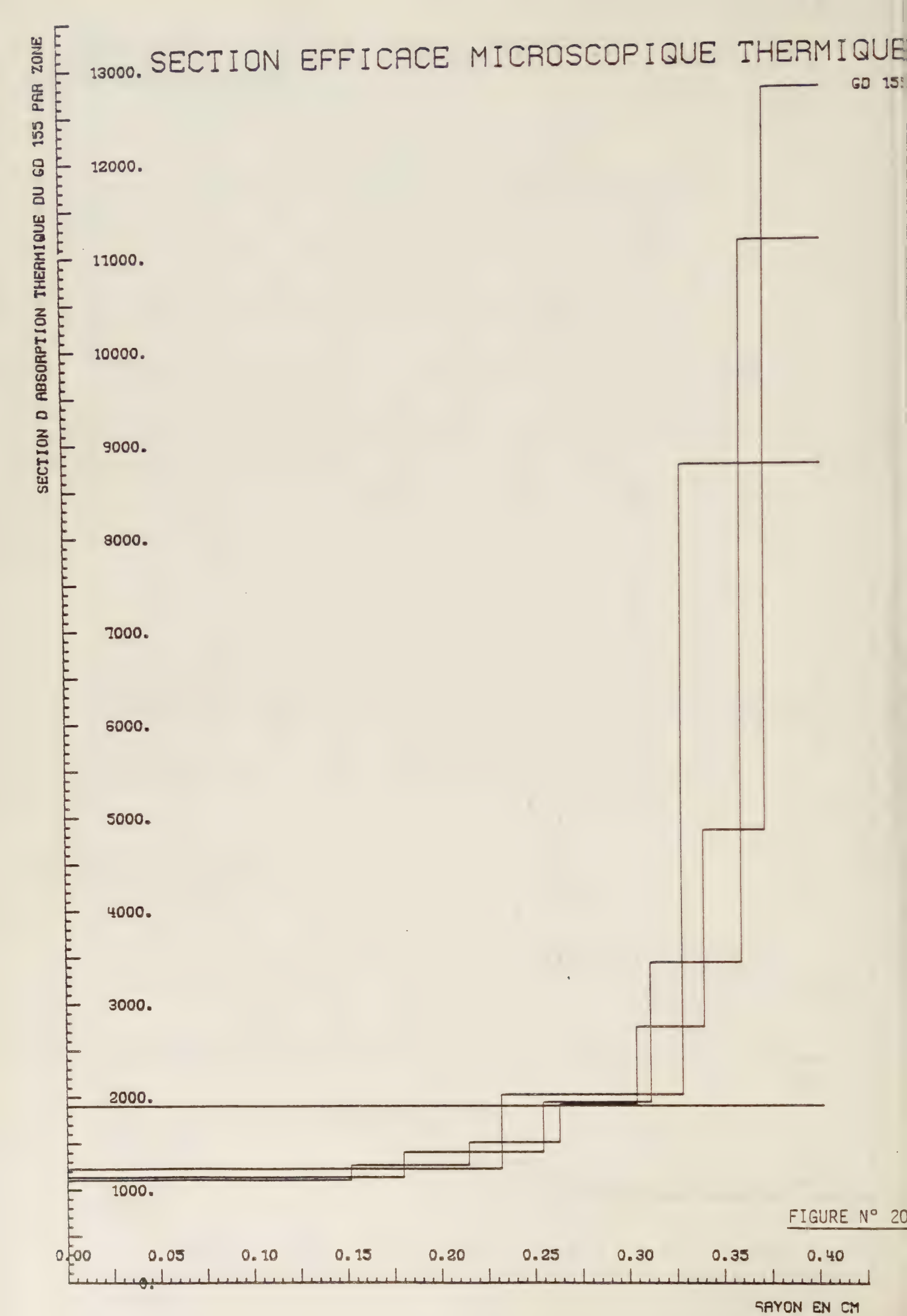

SECTION EFFICACE MICROSCOPIQUE THERMIQUE
GD 15
SECTION D ABSORPTION THERMIQUE DU GD 155 PAR ZONE
13000.
12000.
11000.
10000.
9000.
8000.
7000.
6000.
5000.
4000.
3000.
2000.
1000.
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
0.35
0.40
RAYON EN CM

FIGURE N° 20

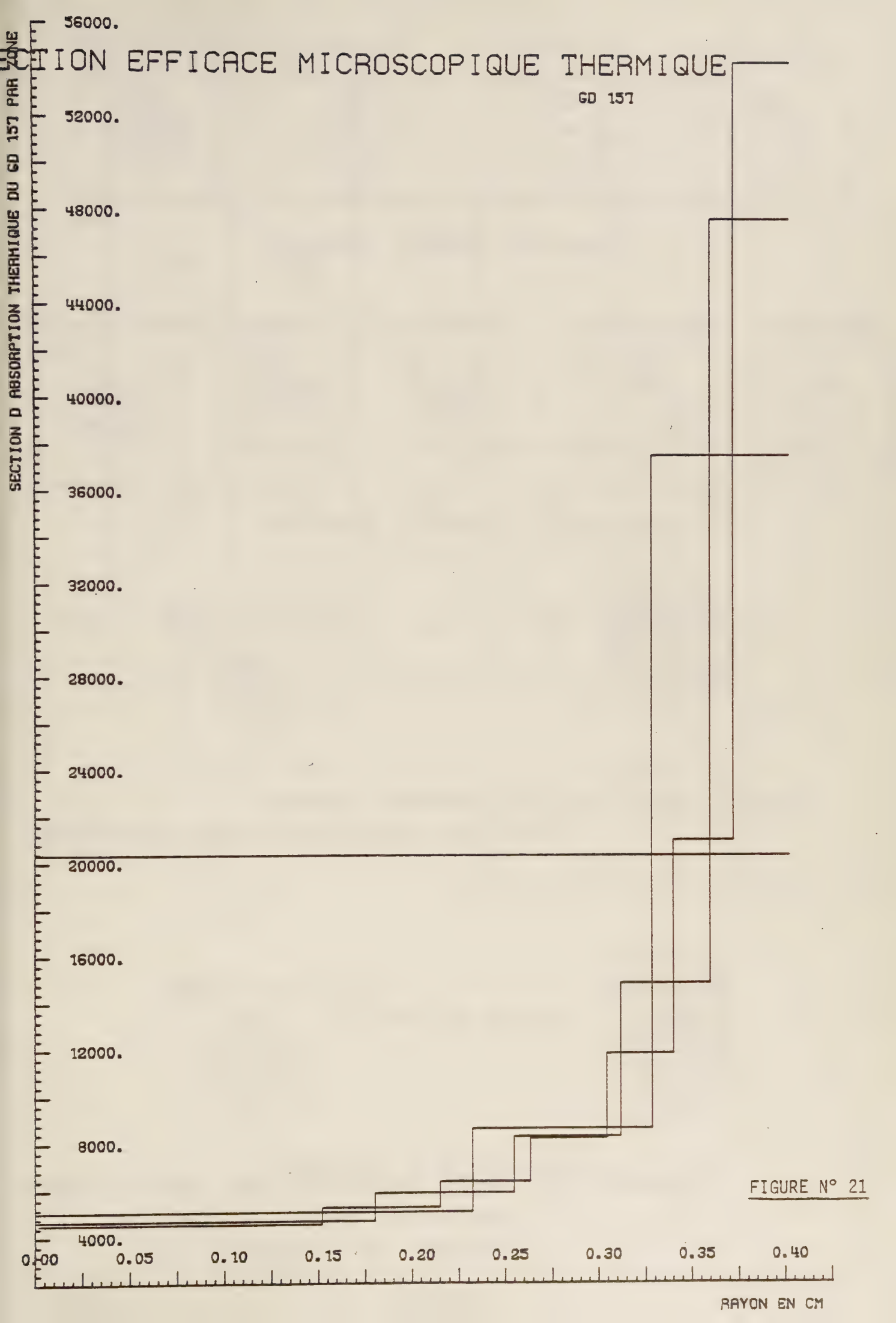
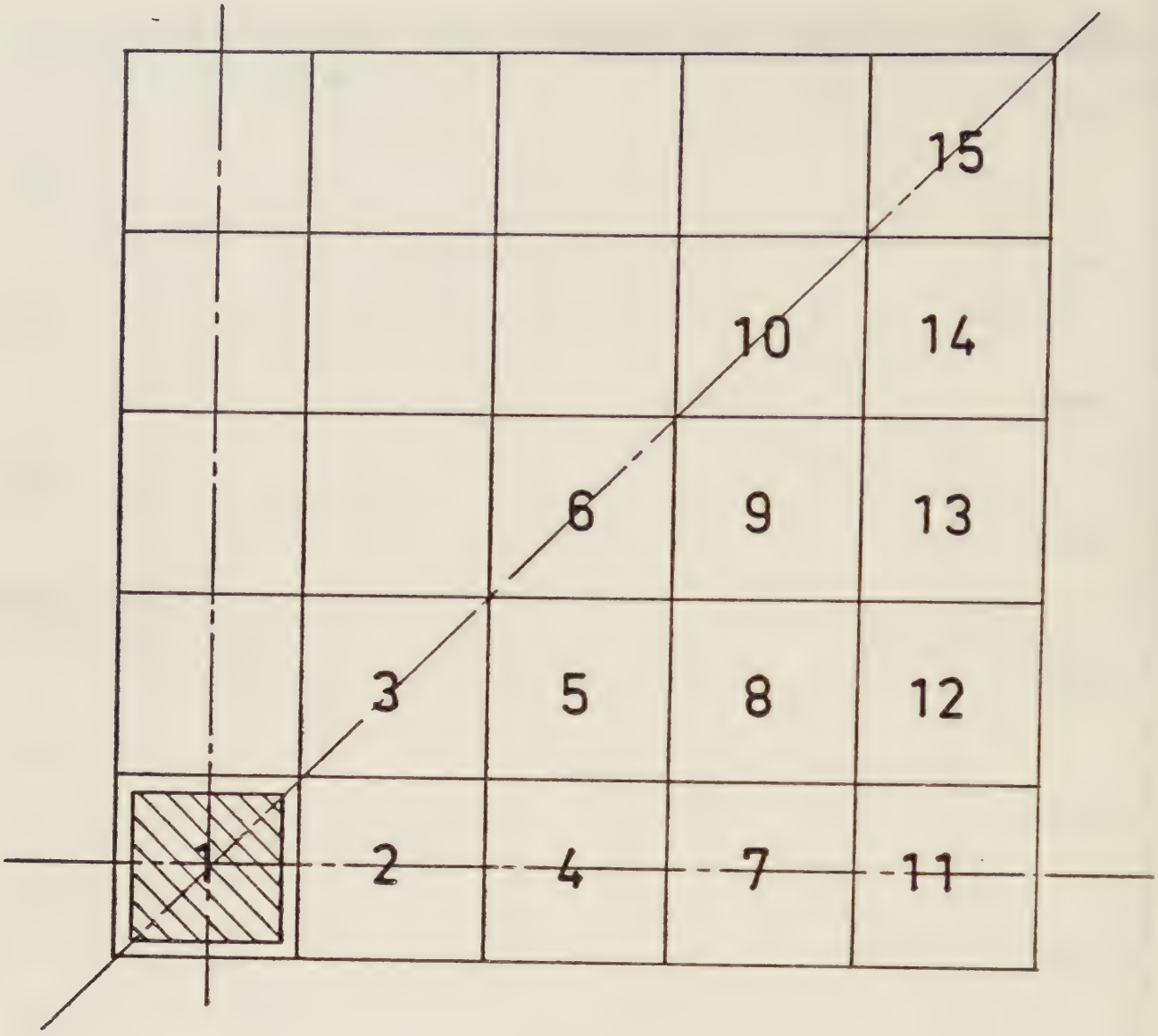

CTION EFFICACE MICROSCOPIQUE THERMIQUE
GD 157
SECTION D ABSORPTION THERMIQUE DU GD 157 PAR LONE
56000.
52000.
48000.
44000.
40000.
36000.
32000.
28000.
24000.
20000.
16000.
12000.
8000.
4000.
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
0.35
0.40
RAYON EN CM

FIGURE N° 21

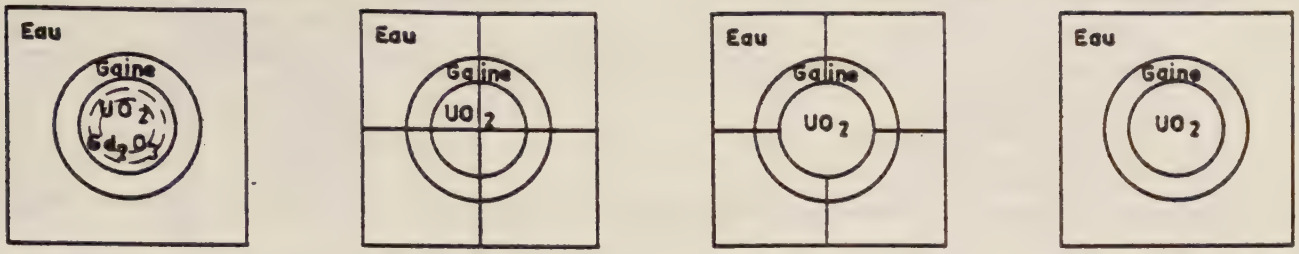


I = N° de la cellule génératrice combustible

Cellule UO_2-Gd_2O_3

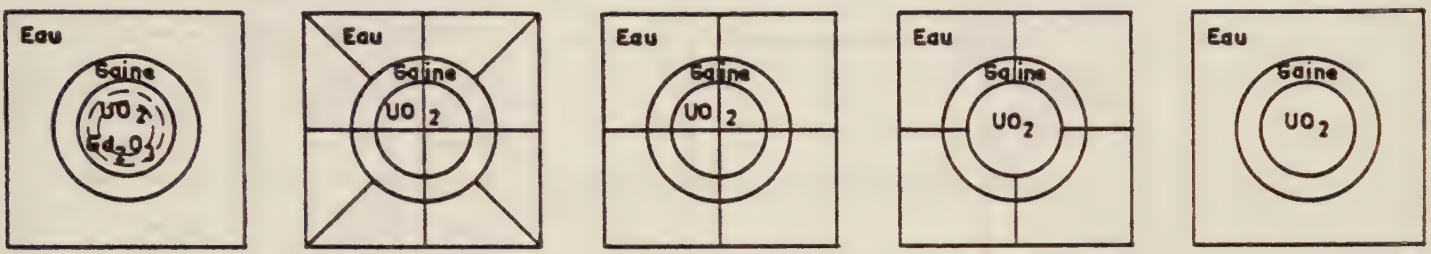
Figure N° 22 : Motif multicellules pour le calcul de la configuration avec un crayon UO_2-Gd_2O_3

Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3) Cellules 2 à 3 Cellules 4 à 6 Cellules 7 à 15



Multicellules MARSYAS (68 points)

Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3) Cellule 2 Cellule 3 Cellules 4 à 6 Cellules 7 à 15

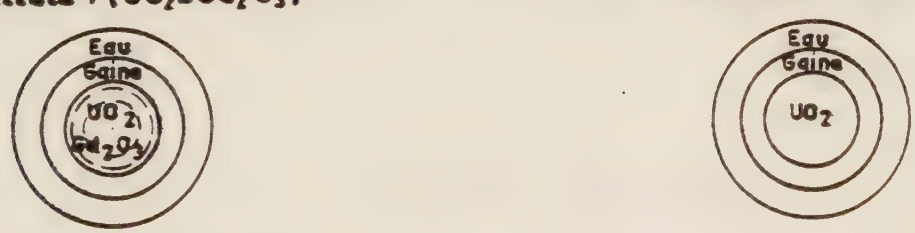


Multicellules NAUSICAA P1 et P0 (70 points)

Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3) Cellules 2 à 15

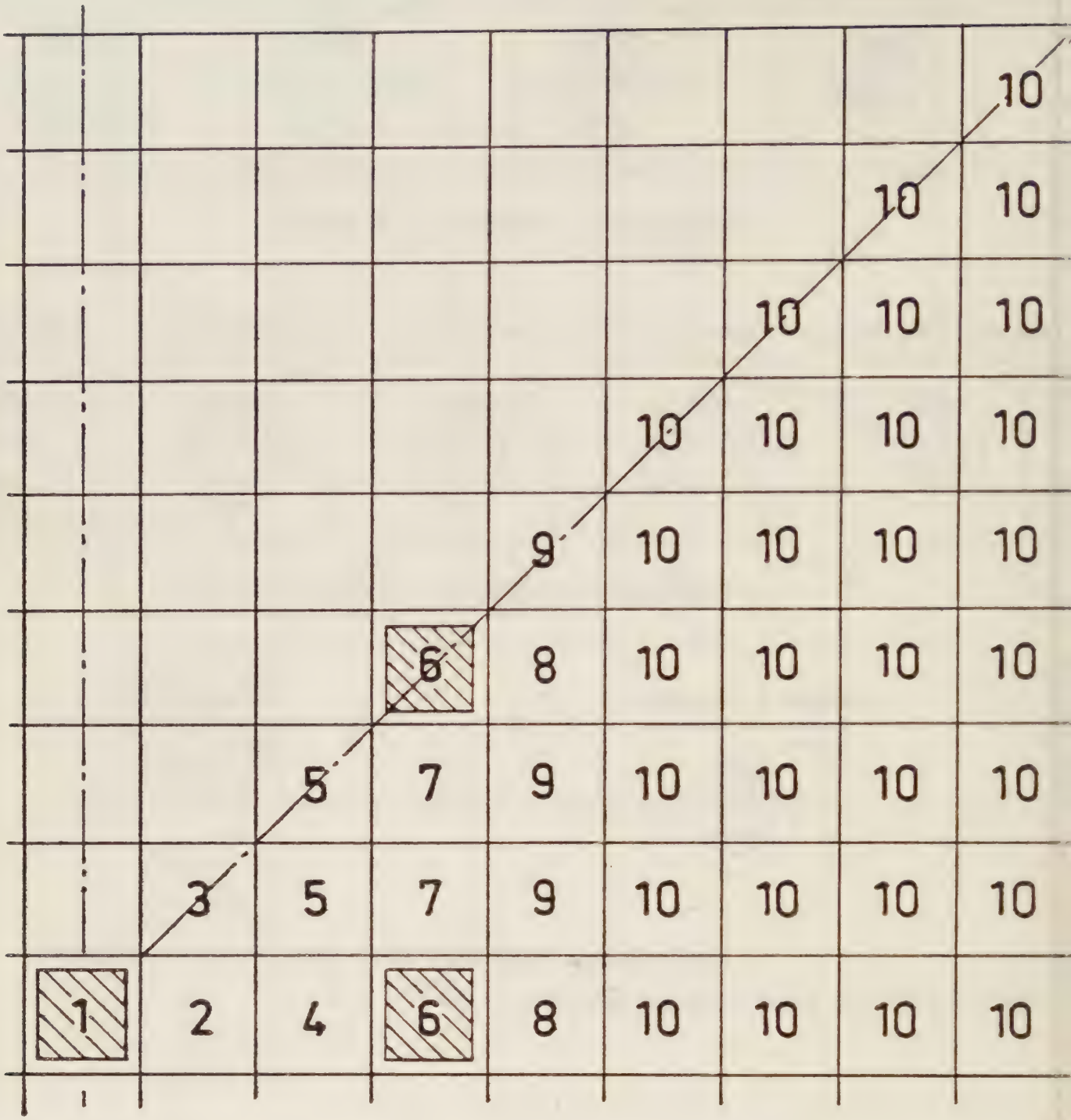
Multicellules EURYDICE DP_1, DP_0, ROTH×4 (47 points)

Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3) Cellules 2 à 15



Multicellules ROTH (47 points)

. FIG:23 .

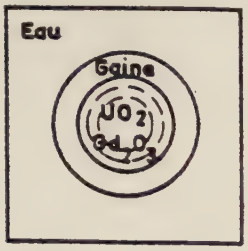


I = N° de la cellule génératrice combustible

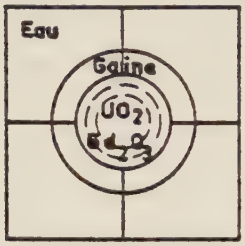
Cellule UO_2-Gd_2O_3

Figure N° 24: Motif multicellules pour le calcul des 9 hétérogénéités

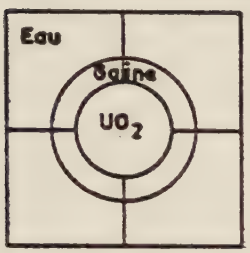
Cellule 1 (UO_2-Gd_2O_3)



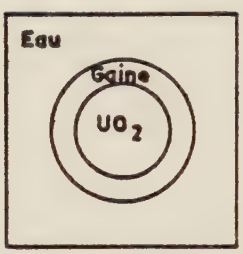
Cellule 6 (UO_2-Gd_2O_3)



Autres cellules



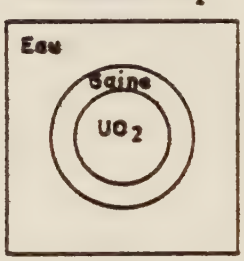
Cellule 10



Multicellules NAUSICAA PO (70 points)

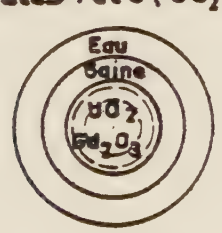
Cellules 1 et 6 (UO_2-Gd_2O_3)

Cellules UO_2

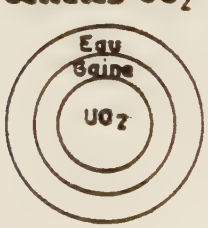


Multicellules EURYDICE DP00 , ROT 4

Cellules 1 et 6 (UO_2-Gd_2O_3)



Cellules UO_2



Multicellules ROTH (34 points)

. FIG : 25 .

EFFET EN REACTIVITE

EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE L ECHANTILLON

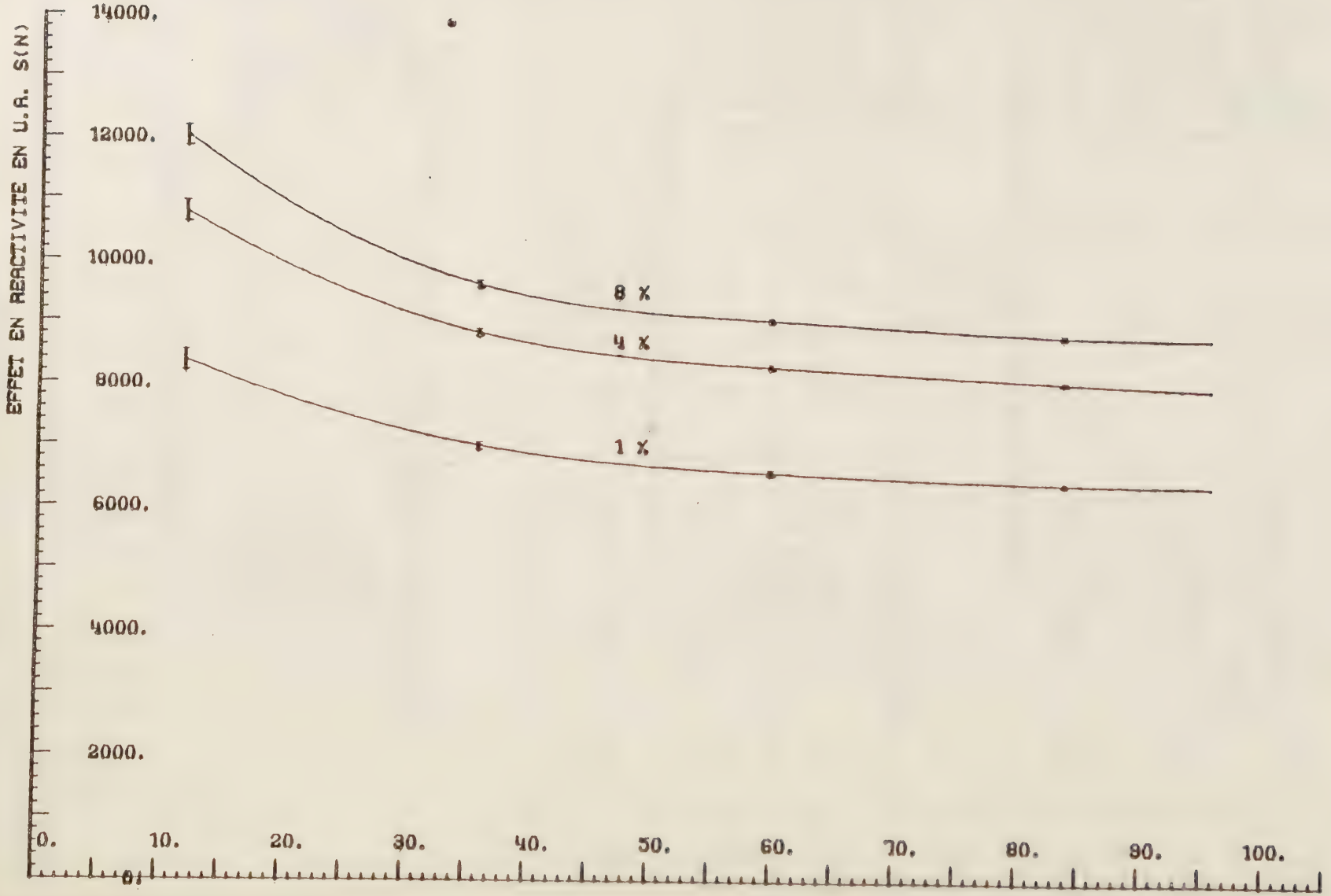


Figure N° 26

VARIATION DE L EFFET DE BOUT

EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE L ECHANTILLON

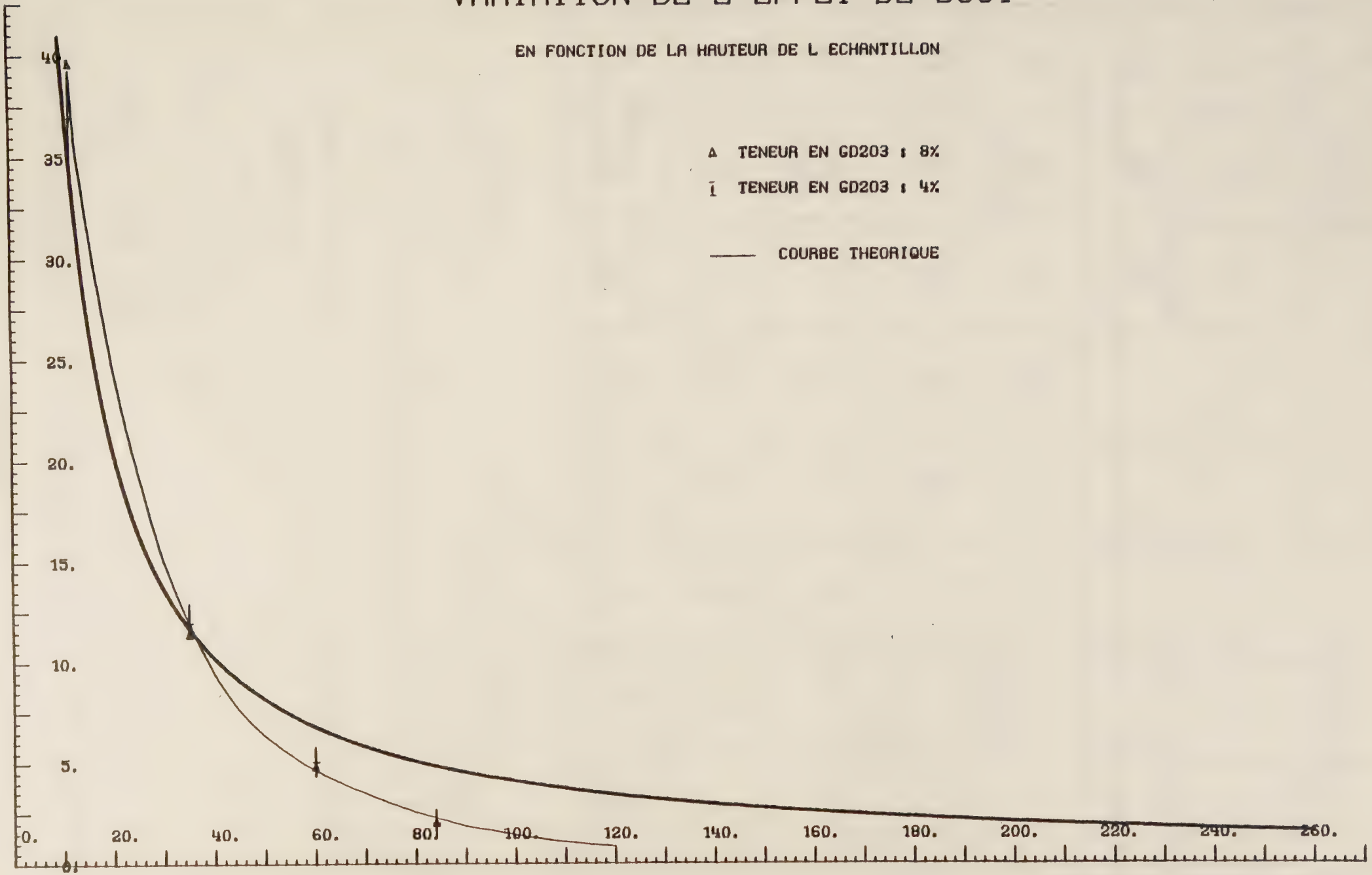
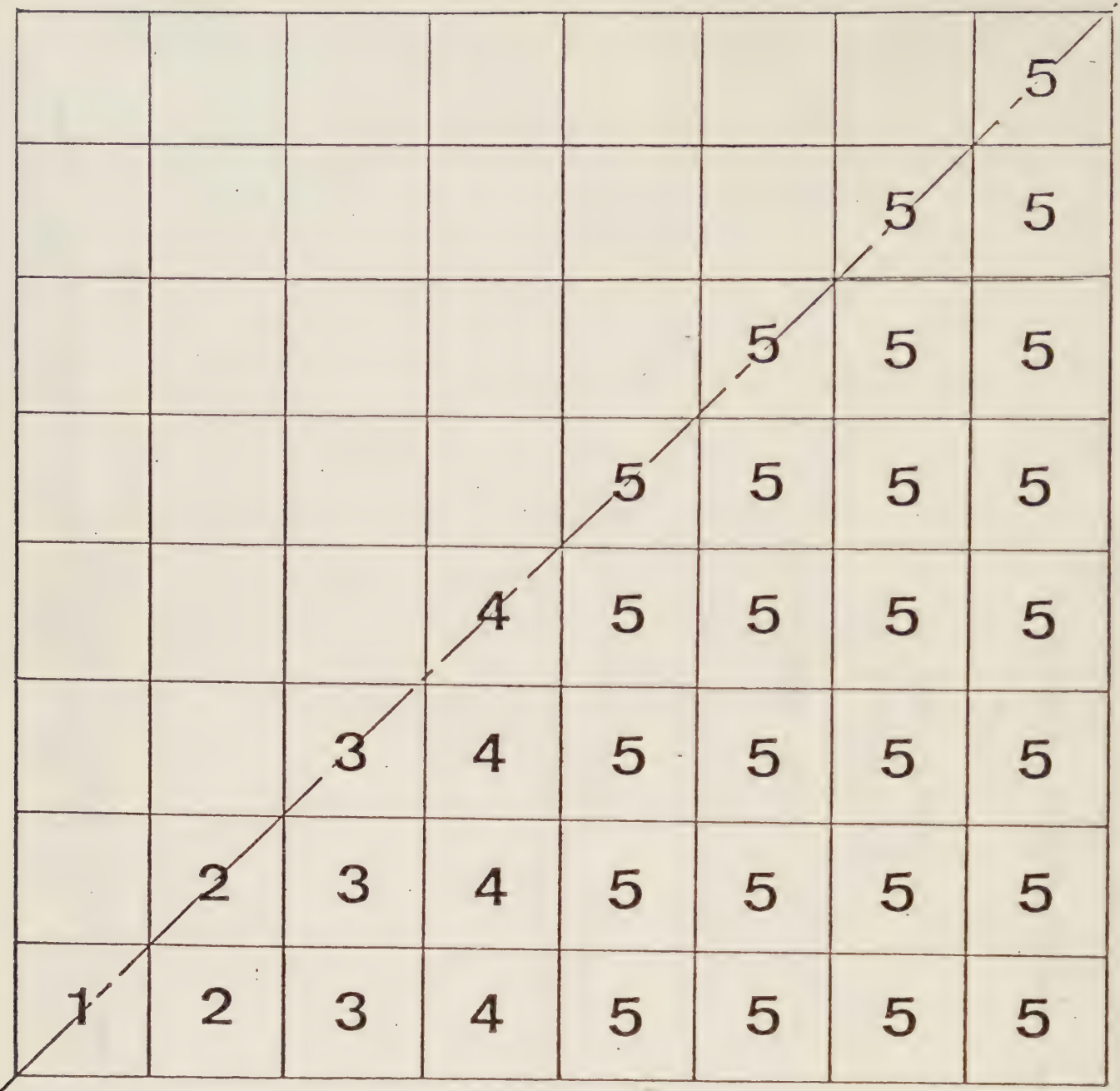


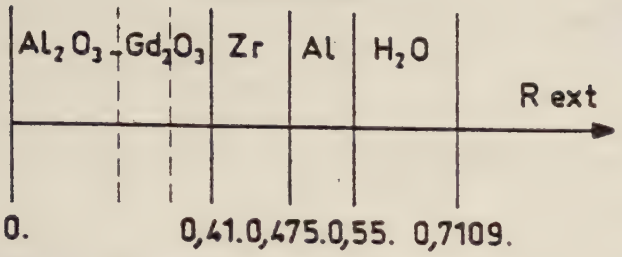
Figure N° 27



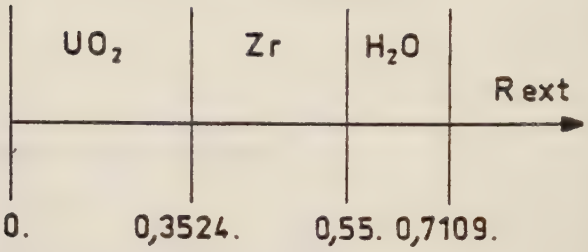
I = n° de la cellule physique

Figure N° 28

CELLULE 1

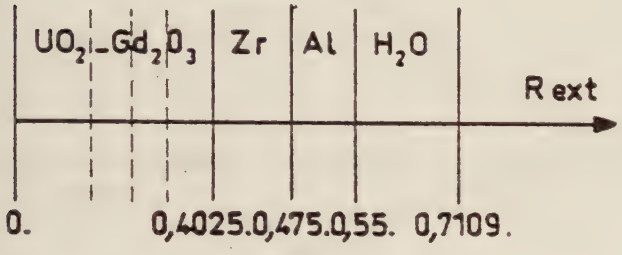


CELLULE 2 A 5

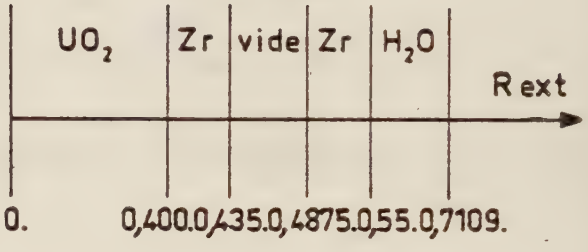


- GEOMETRIE DE CALCUL POUR LES ECHANTILLONS Al_2O_3-Gd_2O_3 DES SERIES B ET D -

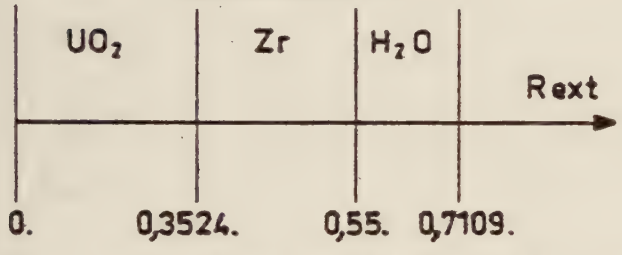
CELLULE 1



CELLULE 2

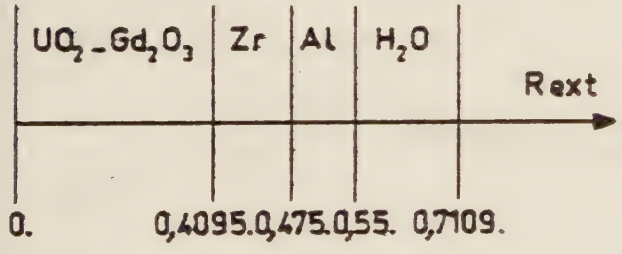


CELLULE 3 A 5

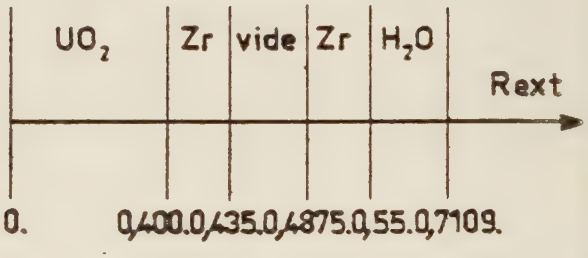


- GEOMETRIE DE CALCUL POUR LES ECHANTILLONS UO_2-Gd_2O_3 DES SERIES C ET E -

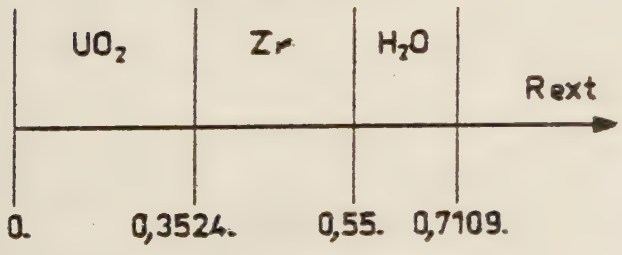
CELLULE 1



CELLULE 2

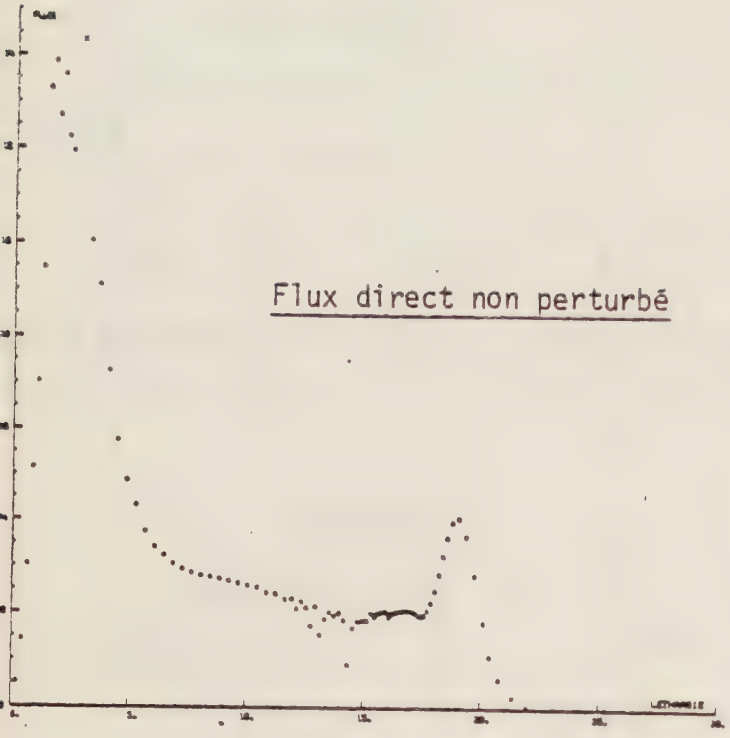


CELLULE 3 A 5

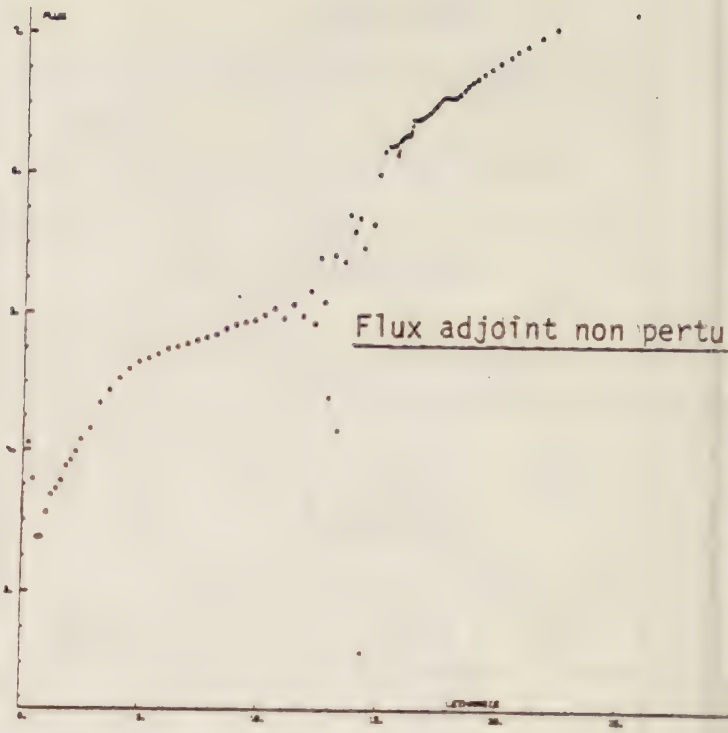


- GEOMETRIE DE CALCUL POUR LES ECHANTILLONS UO_2-Gd_2O_3 DE LA SERIE A -

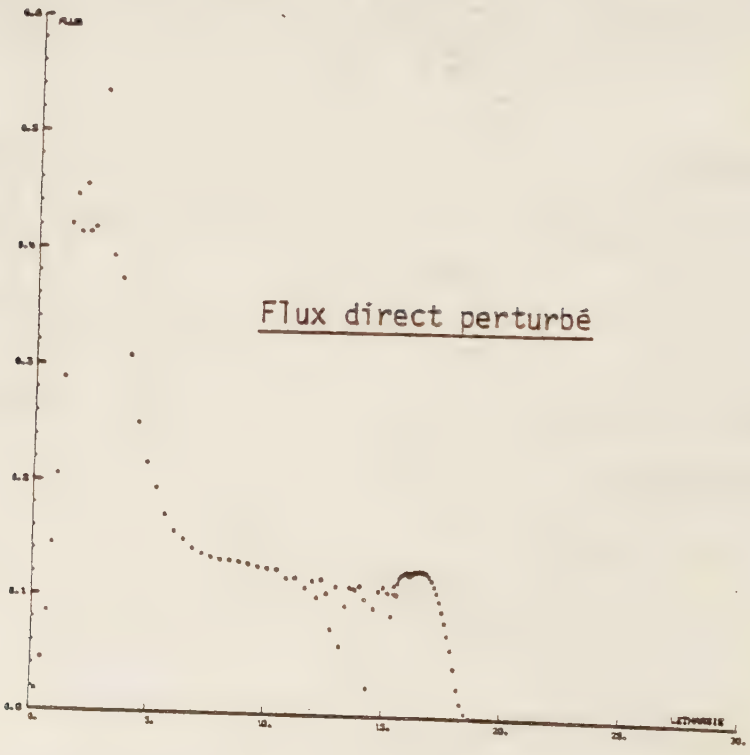
FIG : 29



Flux direct non perturbé



Flux adjoint non pertu



Flux direct perturbé

FIGURE N° 30

CAMPAGNE MINERVE 1981

HAUTEUR GD = 36 MM

INTERPRETATION DES OSCILLATIONS D ECHANTILLONS

D ALUMINE GADOLINIEE

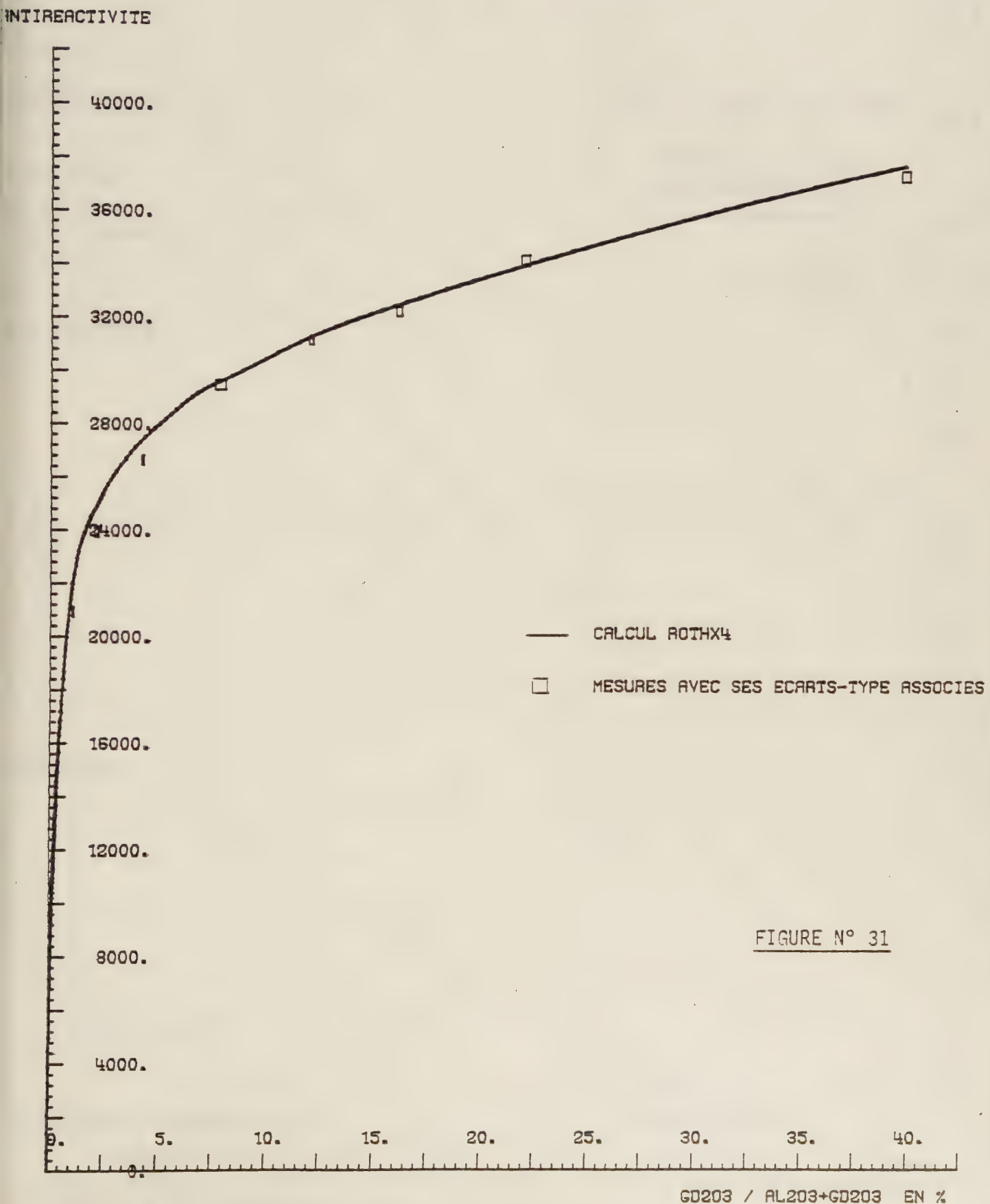


FIGURE N° 31

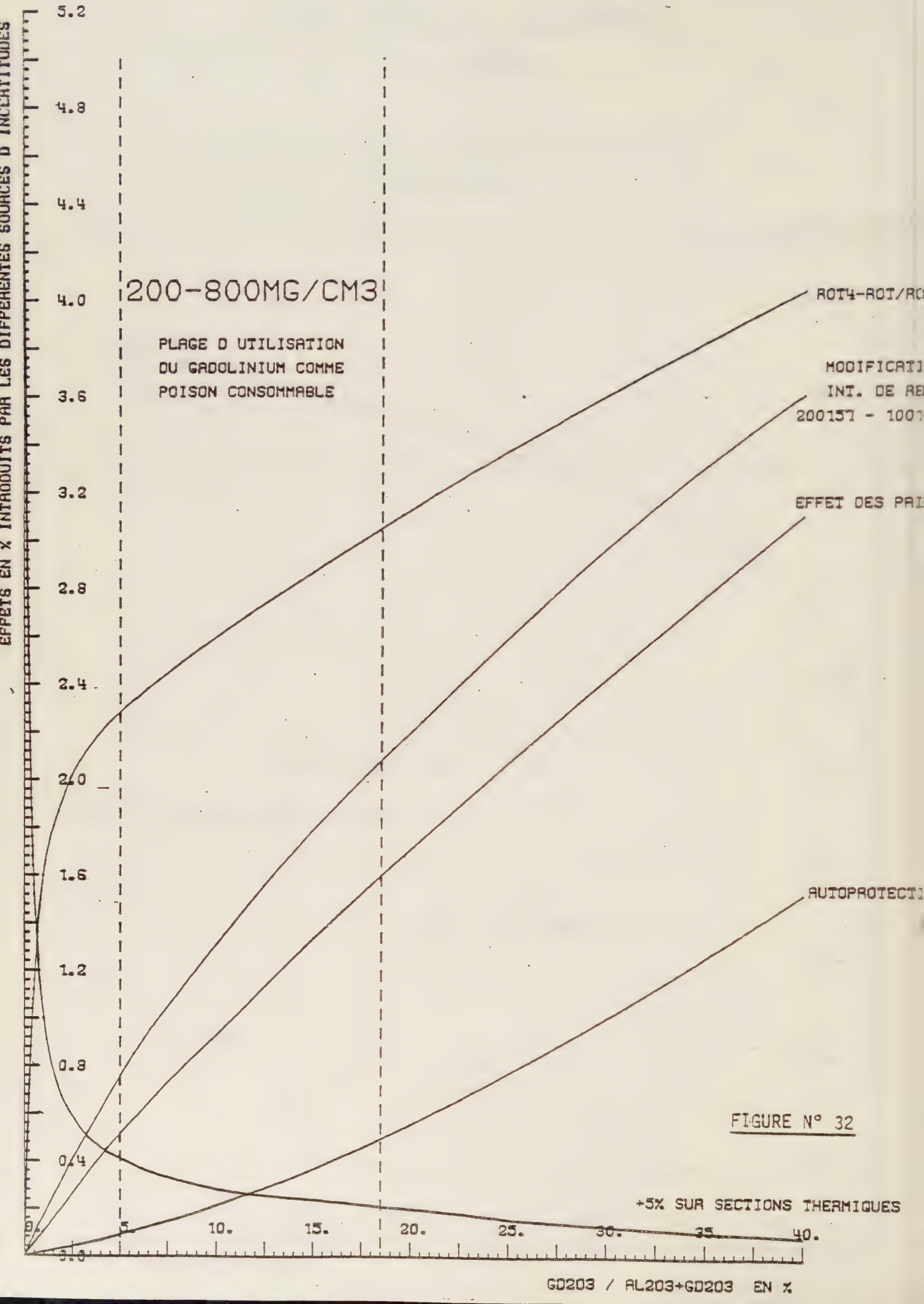

EFFETS EN % INTRODUITS PAR LES DIFFERENTES SOURCES D INCERTITUDES
5.2
4.8
4.4
4.0
3.6
3.2
2.8
2.4
2.0
1.6
1.2
0.8
0.4
0.
200-800MG/CM3
PLAGE D UTILISATION
DU GADOLINIUM COMME
POISON CONSOMMABLE
ROT4-ROT/RO
MODIFICATI
INT. DE RE
200157 - 1001
EFFET DES PAI
AUTOPROTECTI
+5% SUR SECTIONS THERMIQUES
5.
10.
15.
20.
25.
30.
35.
40.
GD203 / AL203+GD203 EN %

FIGURE N° 32

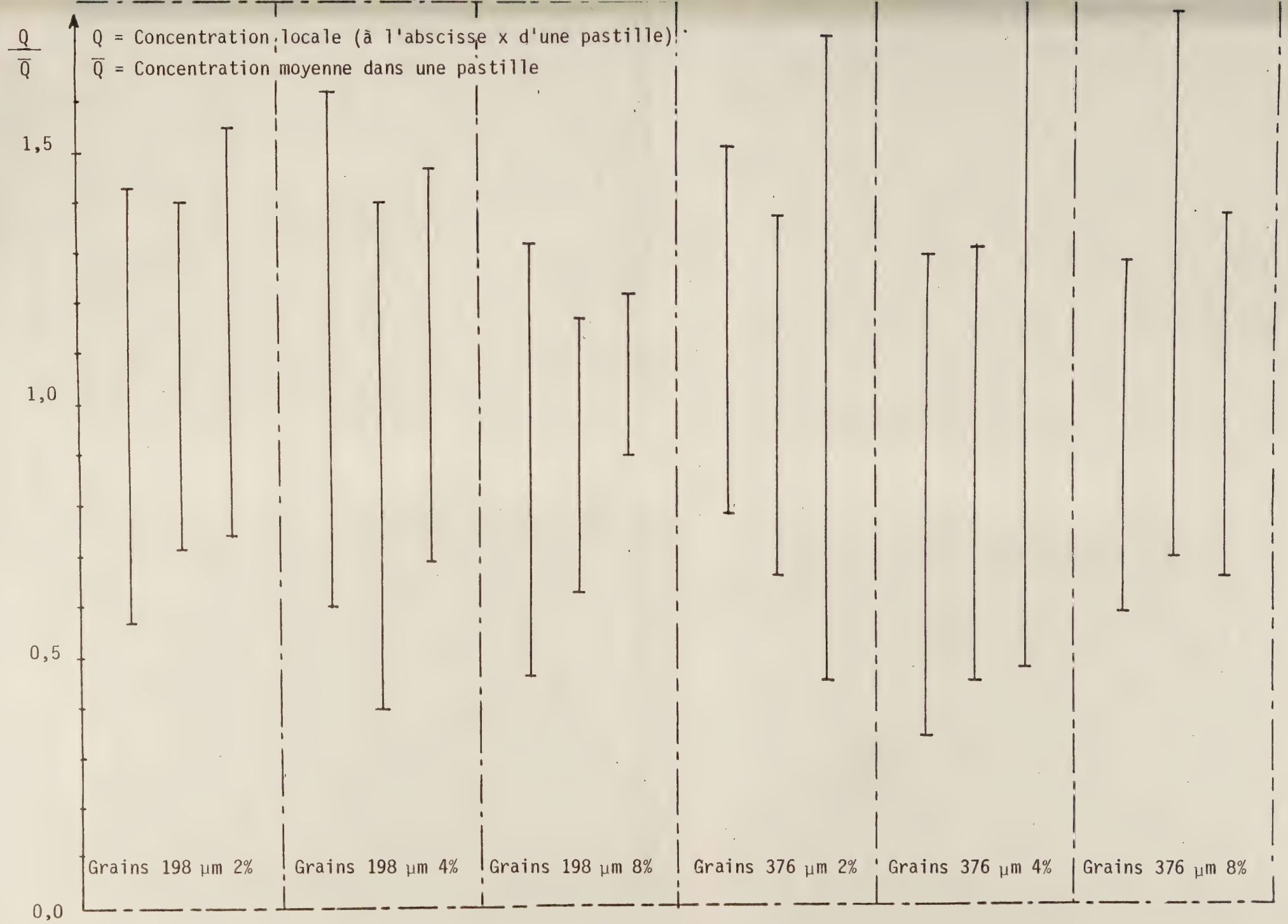
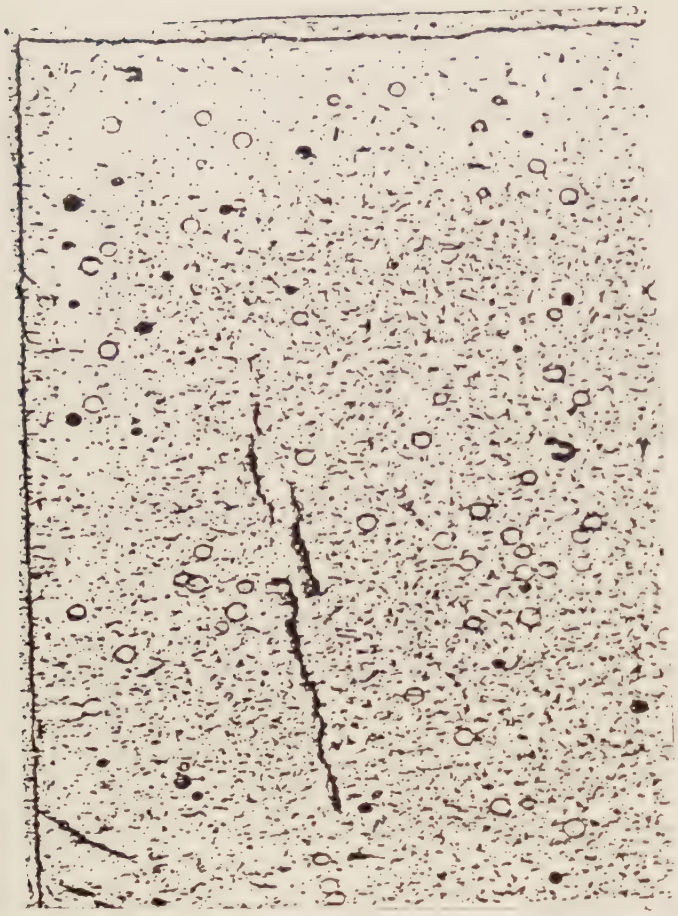
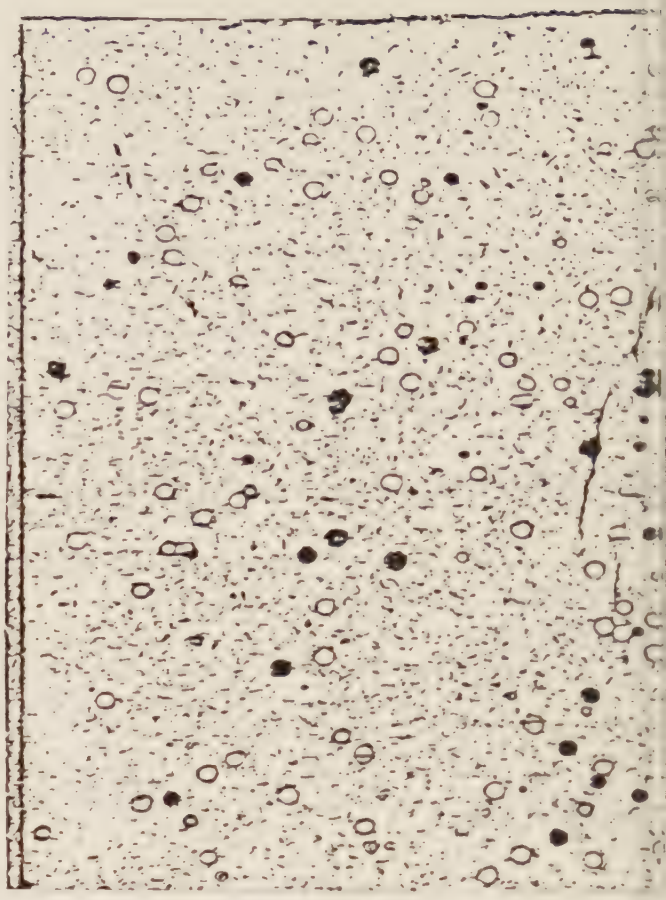

Q = Concentration locale (à l'abscisse x d'une pastille)
Q̄ = Concentration moyenne dans une pastille
Q/Q̄
1,5
1,0
0,5
0,0
Grains 198 µm 2%
Grains 198 µm 4%
Grains 198 µm 8%
Grains 376 µm 2%
Grains 376 µm 4%
Grains 376 µm 8%

FIGURE N° 33

Aspect micrographique ( )

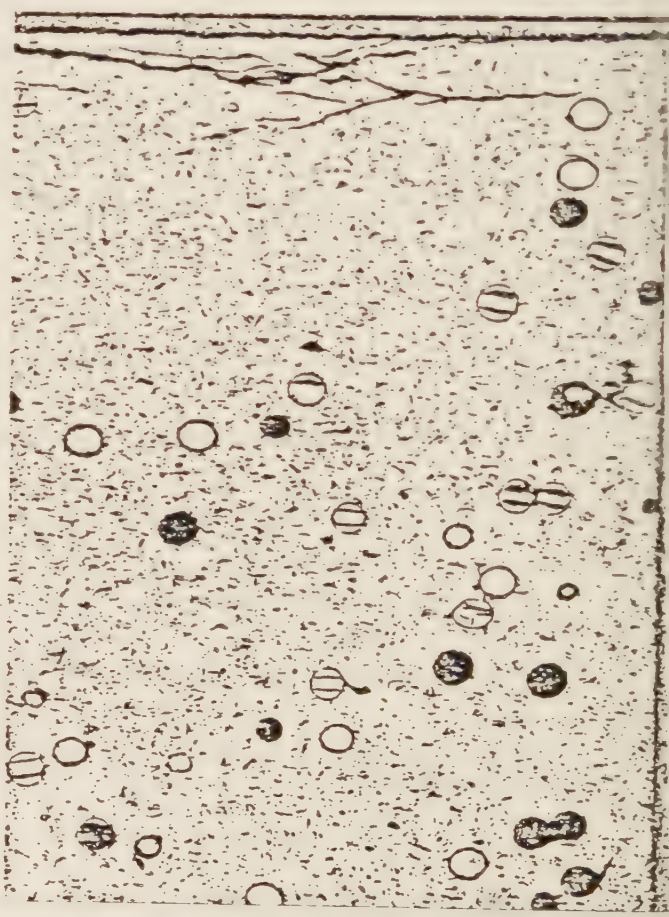


d = 198 µm Al_2O_3 - Gd_2O_3 (4%)



d = 198 µm Al_2O_3 - Gd_2O_3 (8%)

d = 376 µm Al_2O_3 - Gd_2O_3 (4%)



d = 376 µm Al_2O_3 - Gd_2O_3 (8%)

FIGURE N° 34

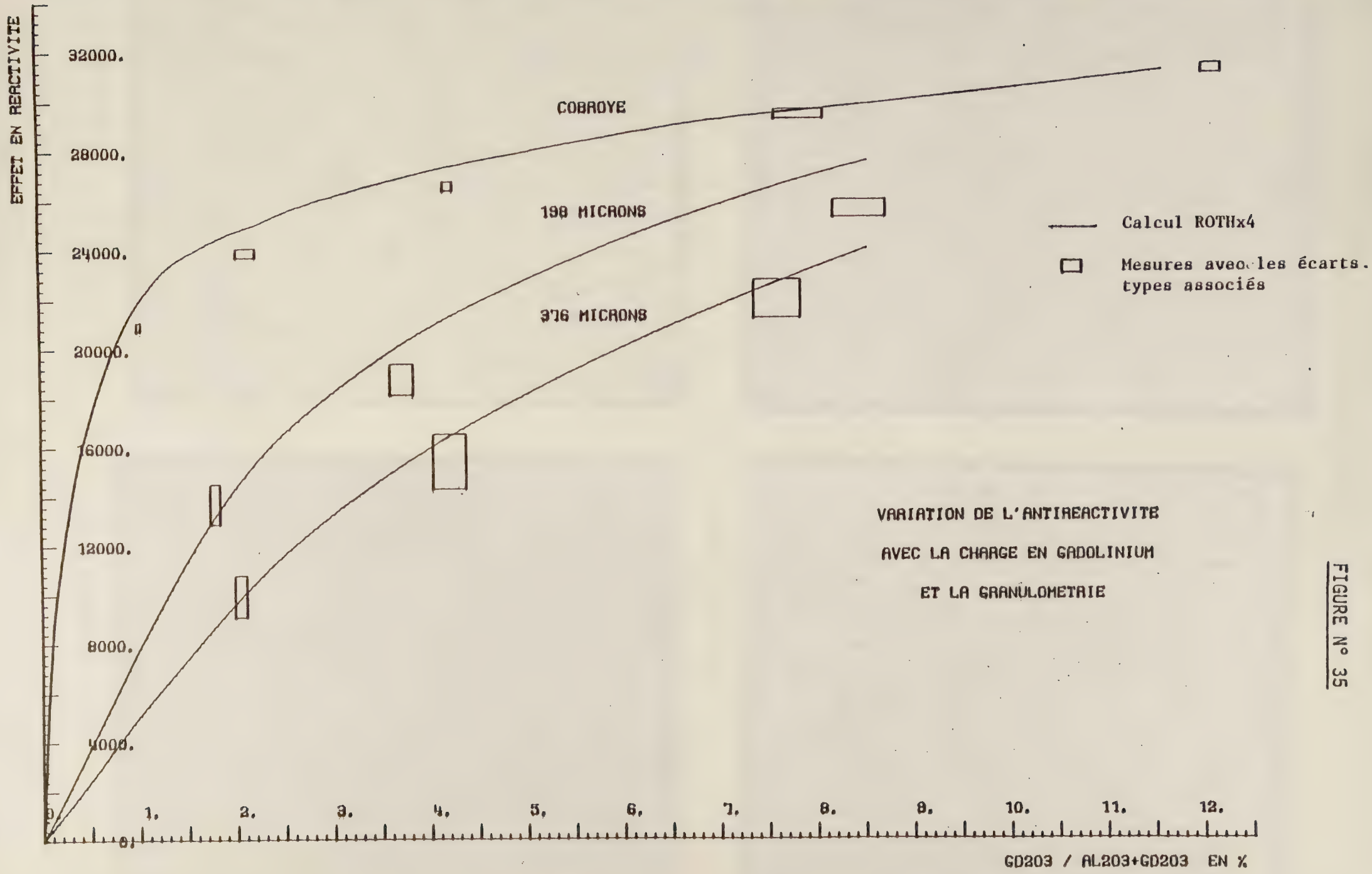
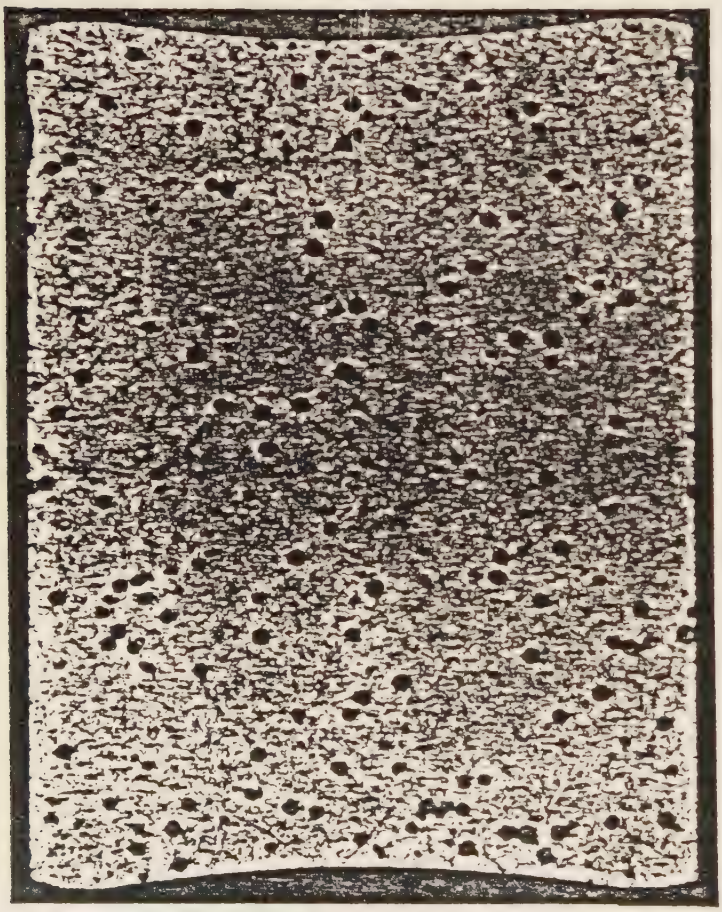

EFFET EN REACTIVITE
32000.
28000.
24000.
20000.
16000.
12000.
8000.
4000.
0.
1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
GD203 / AL203+GD203 EN %
COBROYE
198 MICRONS
376 MICRONS
Calcul ROTHx4
Mesures avec les écarts types associés
VARIATION DE L'ANTIREACTIVITE
AVEC LA CHARGE EN GADOLINIUM
ET LA GRANULOMETRIE

FIGURE N° 35

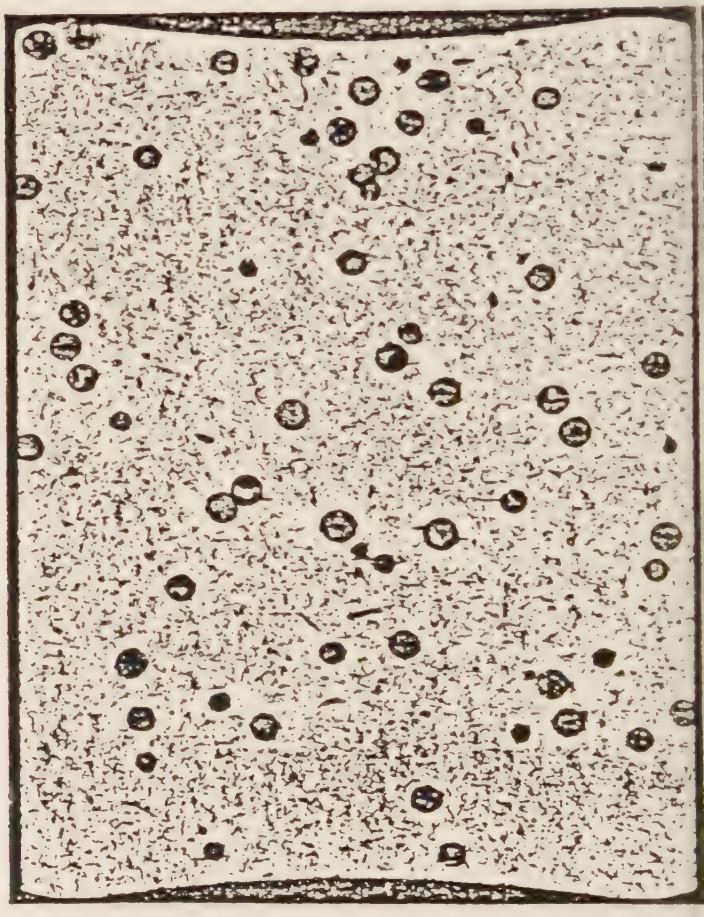
Aspect Micrographique (x10)

d = 80 µm UO_2-Gd_2O_3 (3%)

d = 120 µm UO_2-Gd_2O_3 (3%)

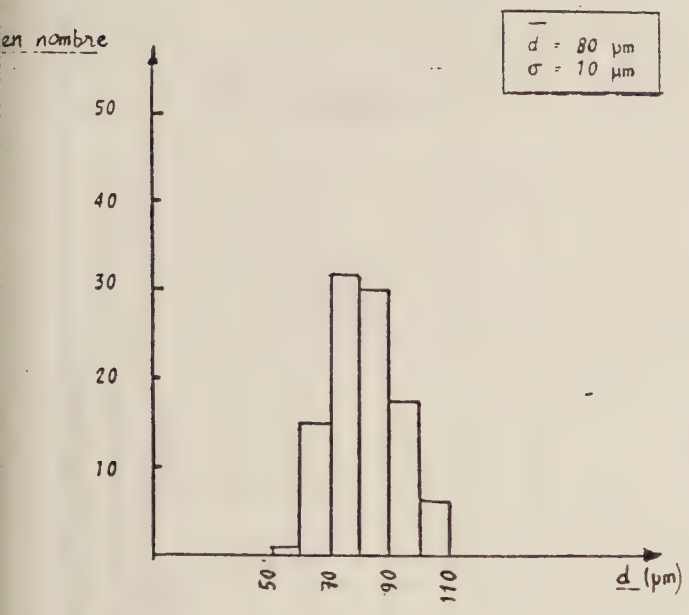


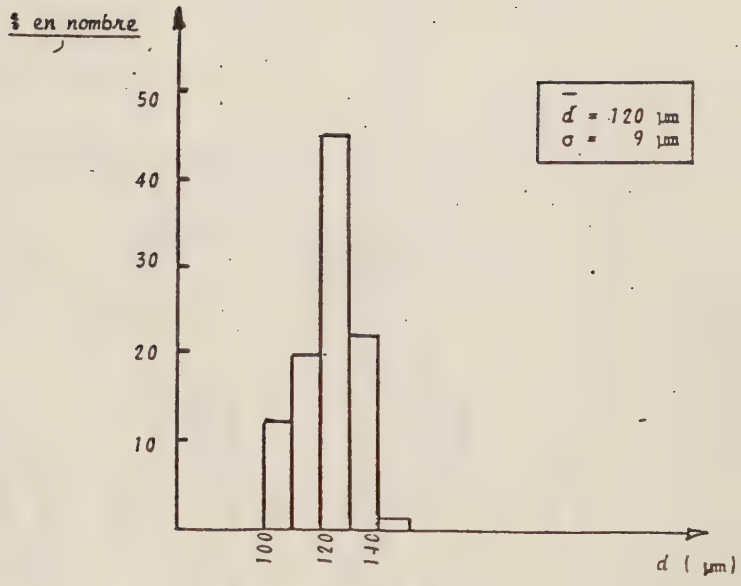
d = 195 µm UO_2-Gd_2O_3 (3%)

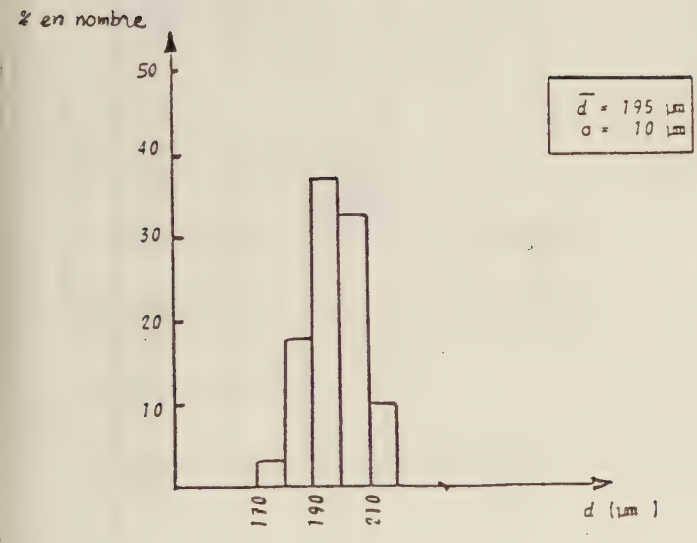


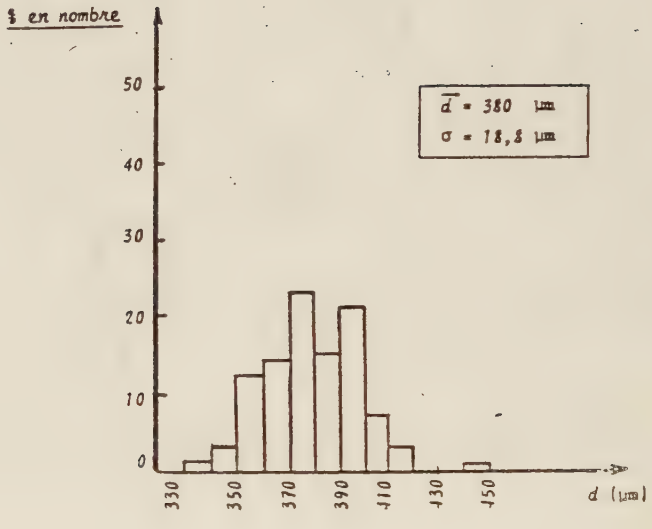
d = 380 µm UO_2-Gd_2O_3 (3%)

FIGURE N° 36









Histogramme de répartition des diamétres

FIGURE N° 37

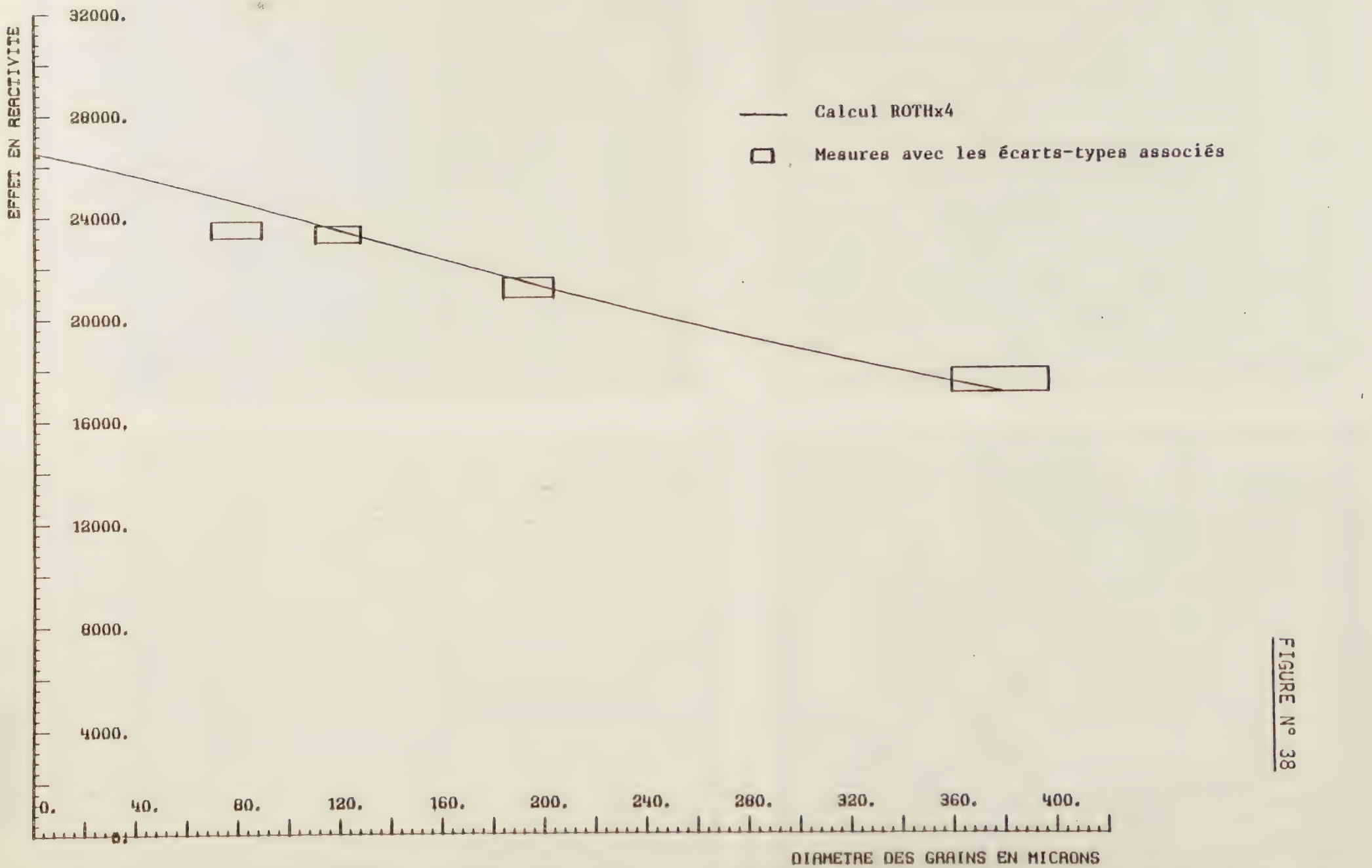
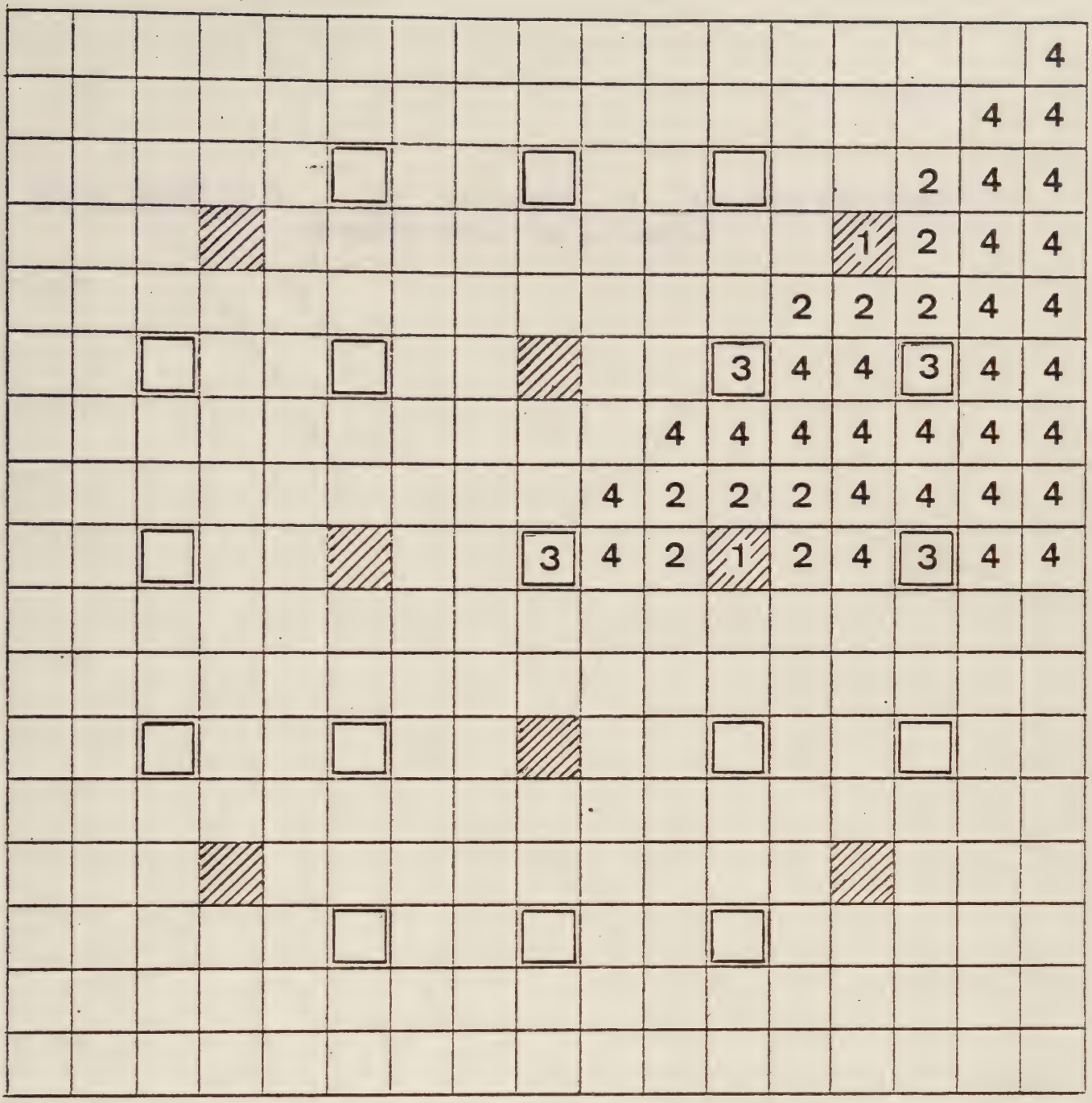

EFFET EN REACTIVITE
32000.
28000.
24000.
20000.
16000.
12000.
8000.
4000.
0.
40.
80.
120.
160.
200.
240.
280.
320.
360.
400.
Calcul ROTHx4
Mesures avec les écarts-types associés
DIAMETRE DES GRAINS EN MICRONS

FIGURE N° 38



Cellule UO_2

Trou d'eau

Cellule UO_2-Gd_2O_3

FIGURE N° 39 : Assemblage PWR 17x17 avec crayons UO_2-Gd_2O_3

VARIATION DU K INFINI DE L'ASSEMBLAGE

EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

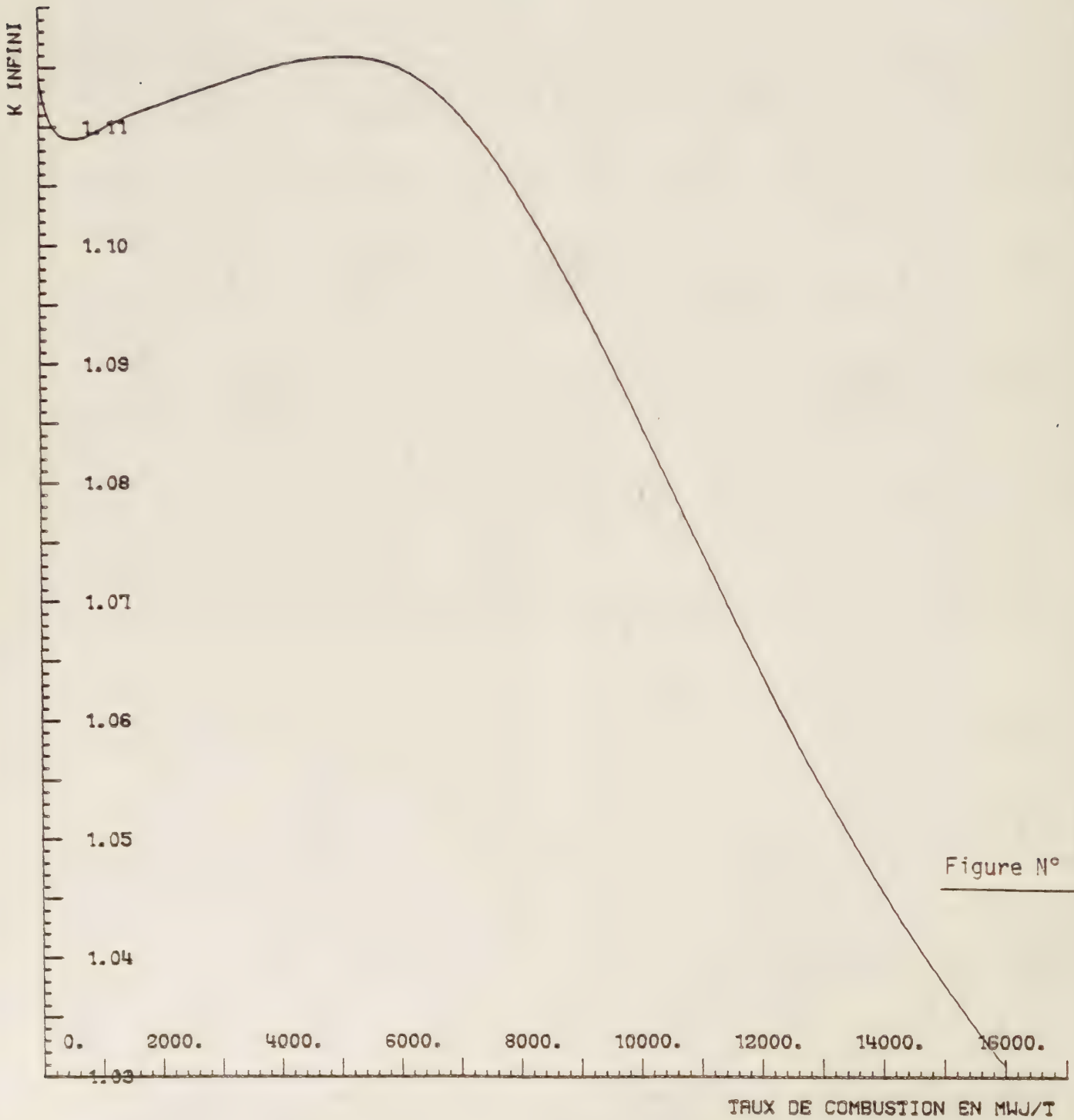


Figure N° 40

VARIATION DE L'ENRICHISSEMENT EN U235

EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

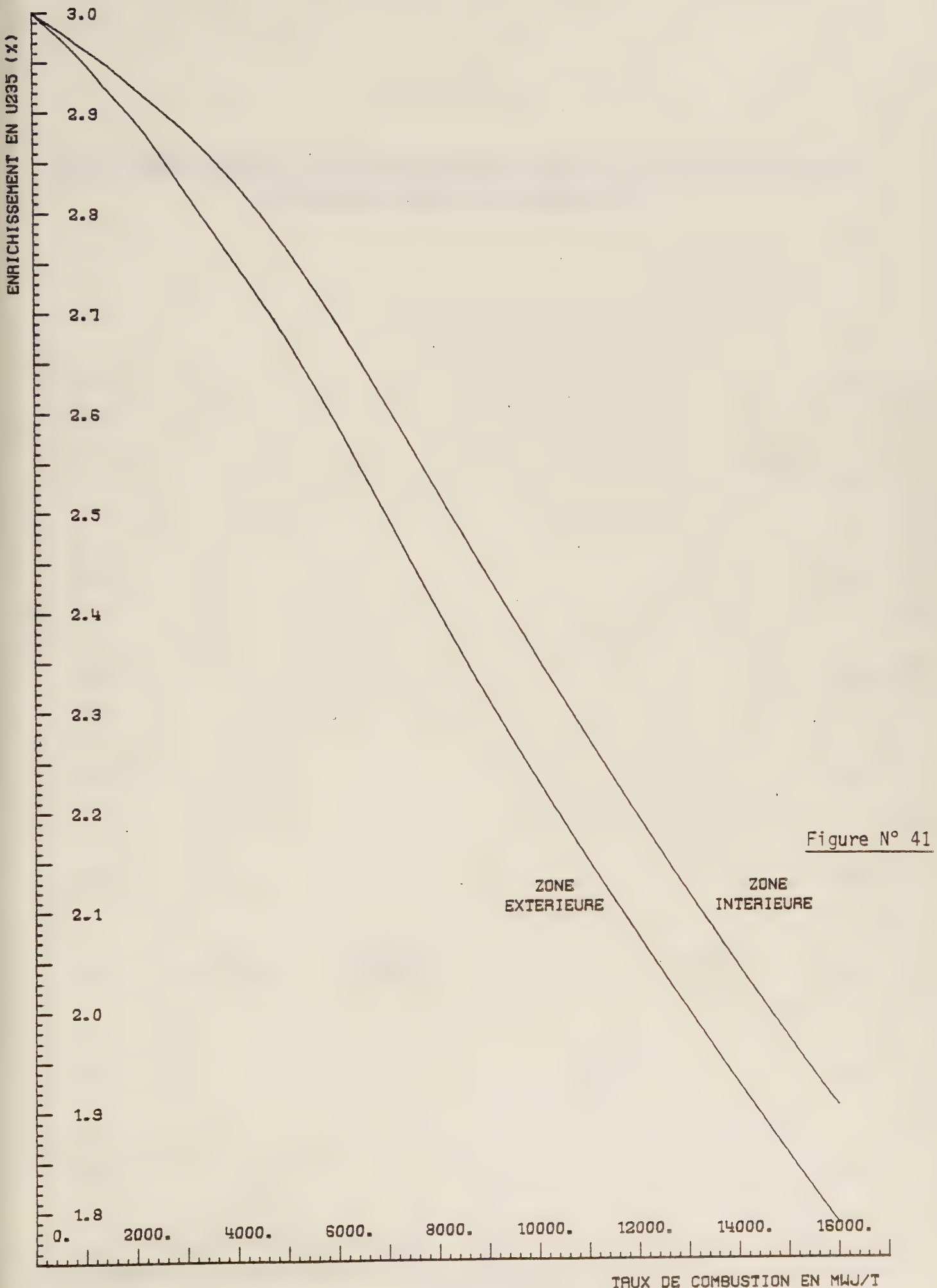


Figure N° 41

VARIATION DE LA CONCENTRATION EN GD 155

EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

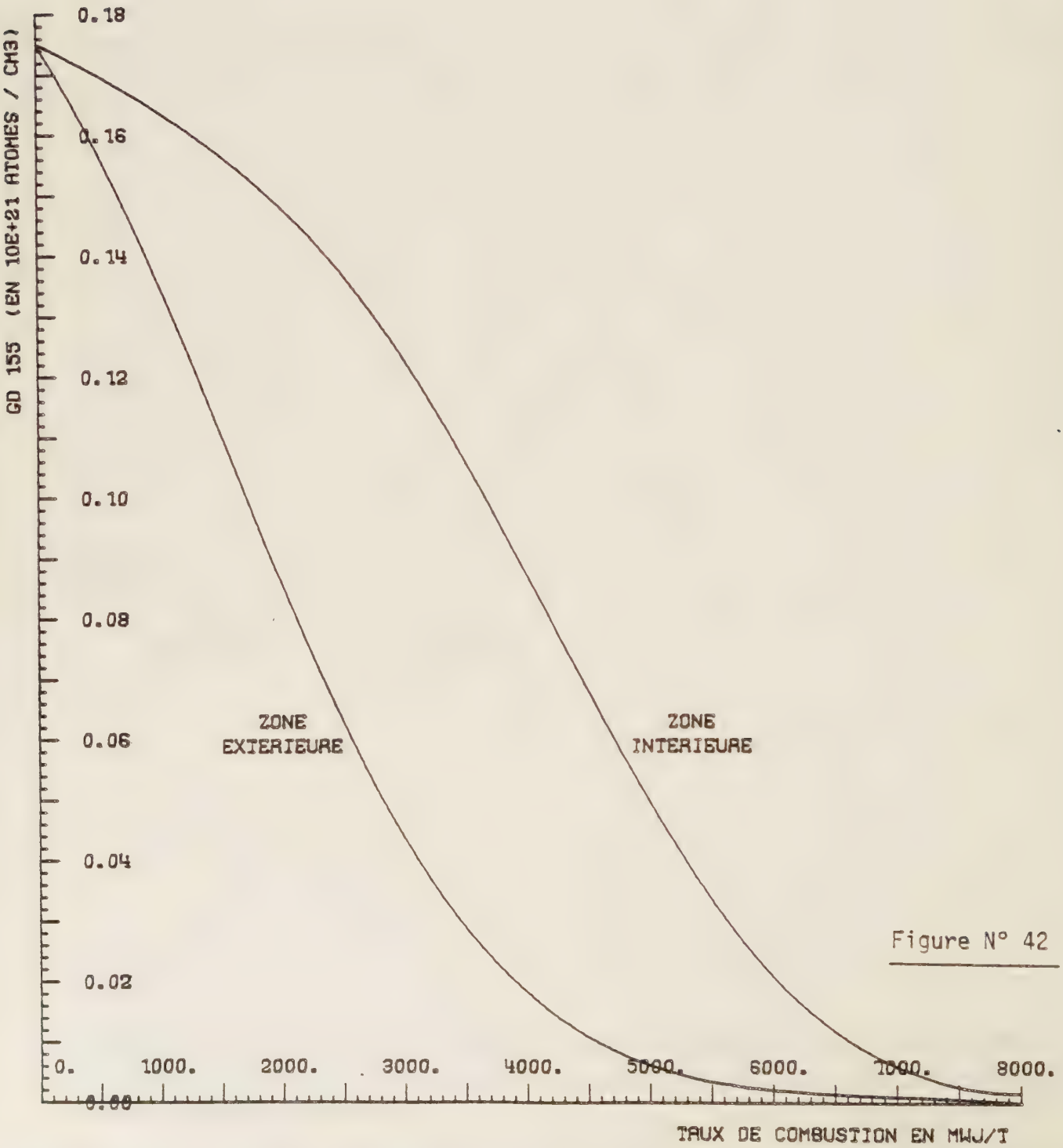


Figure N° 42

VARIATION DE LA CONCENTRATION EN GD 157

EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

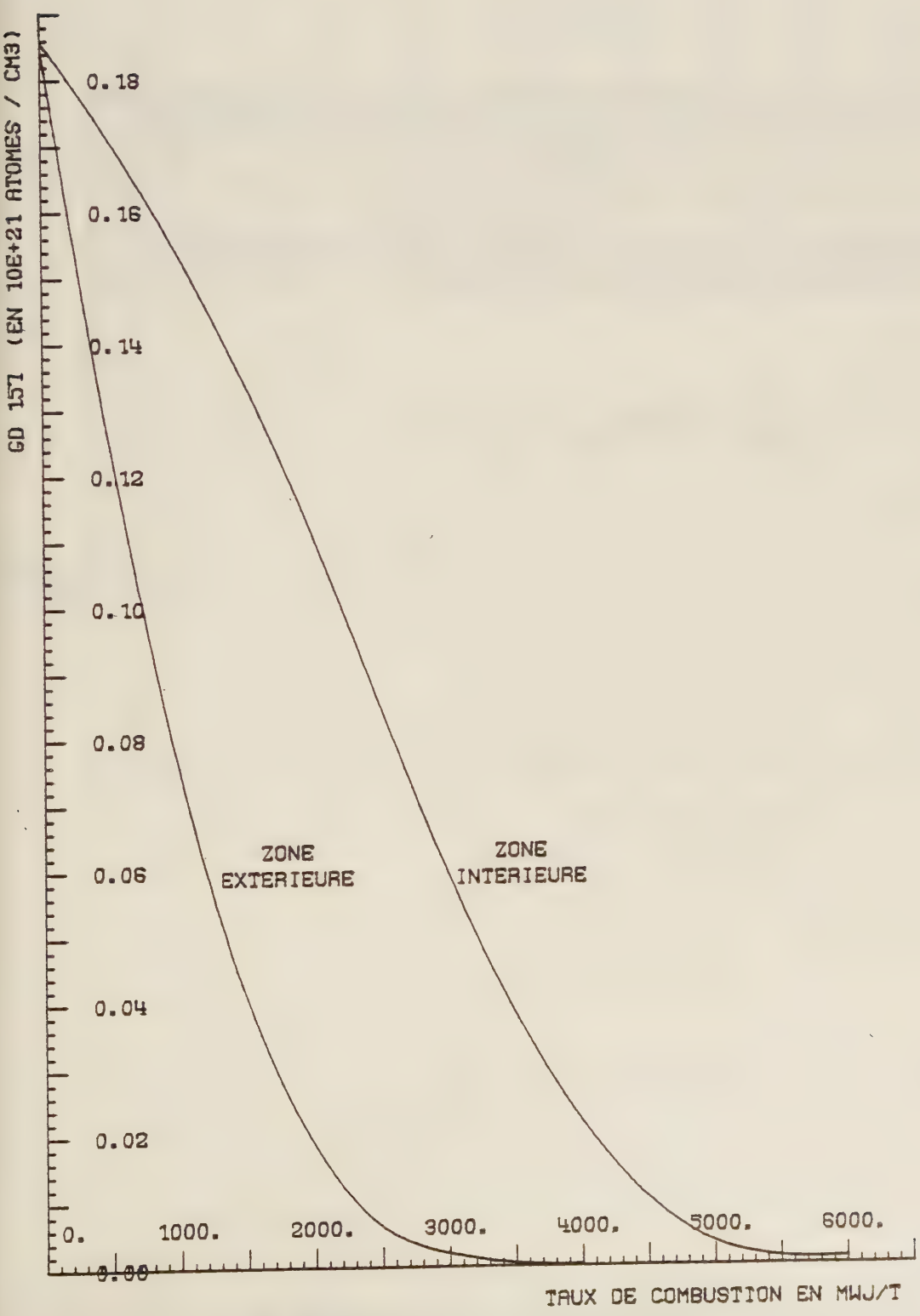
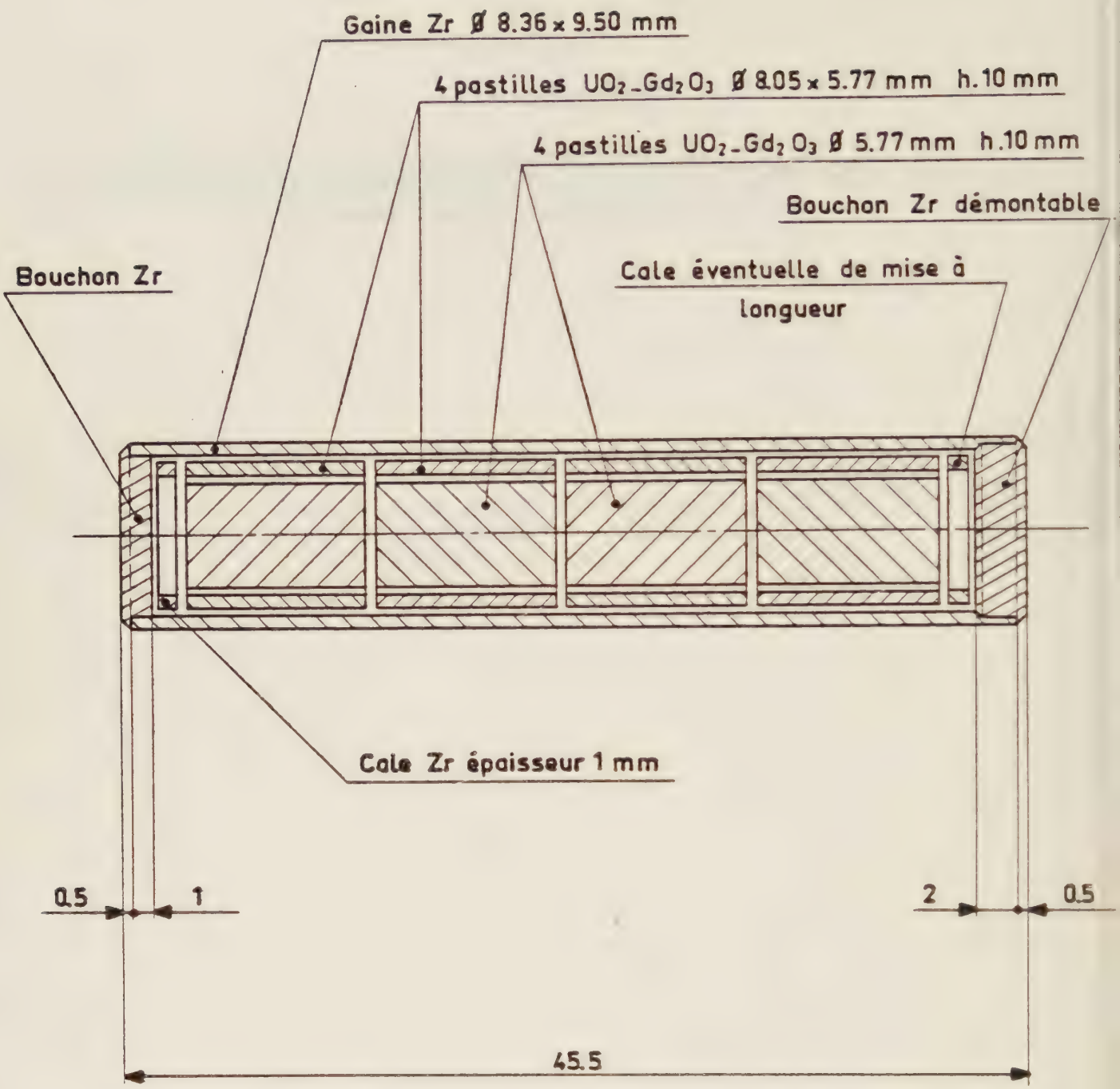


Figure N° 43



. FIG:44. GEOMETRIE DES ECHANTILLONS DE LA SERIE E .

Découpage pour les calculs
du dispositif Gédéon

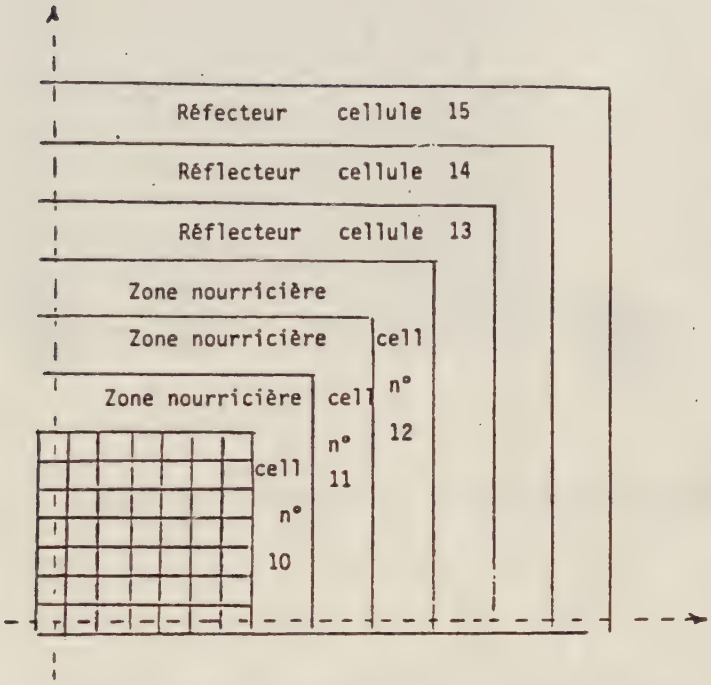
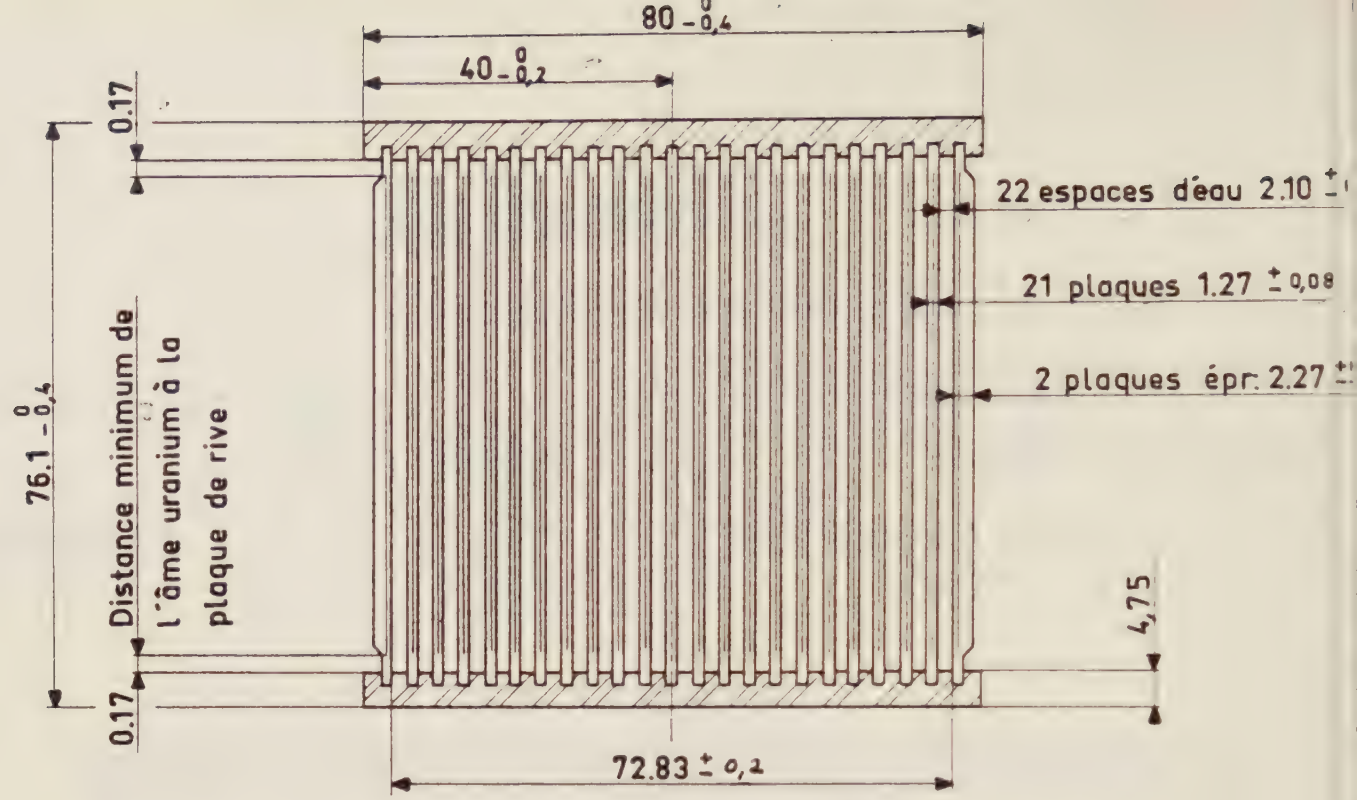


Figure 45a : Description du coeur de MELUSINE

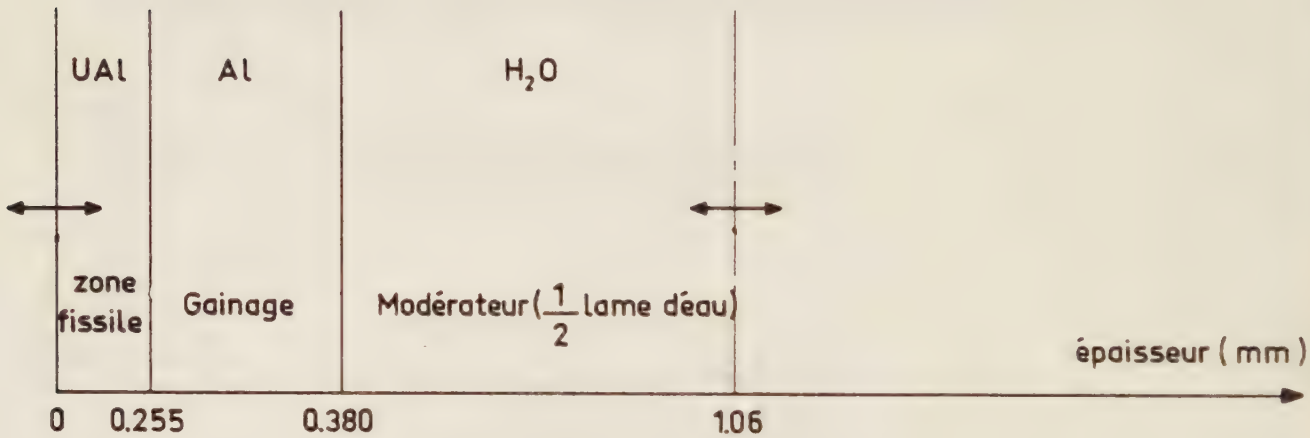
9	9	9	9	9	9	9
8	8	8	8	8	8	9
7	6	3	4	5	8	9
7	6	2	1	4	8	9
7	6	3	2	3	8	9
7	6	6	6	6	8	9
7	7	7	7	7	8	9

Figure 45b : Découpage de la partie centrale

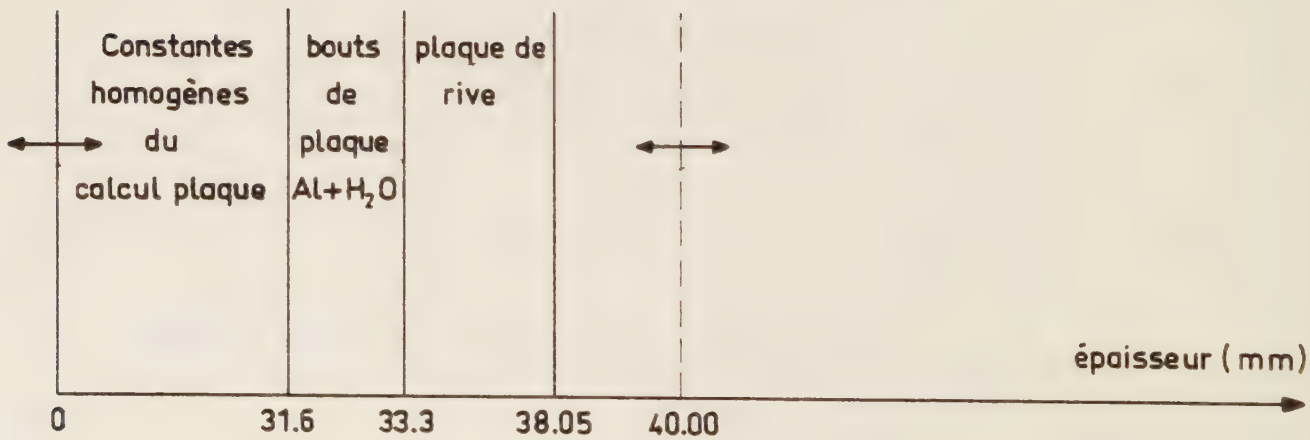
FIGURE N° 45



_ GEOMETRIE REELLE DU FAISCEAU NOURRICIER A 23 PLAQUES _



_ HOMOGENEISATION D'UNE PLAQUE UAl _



_ HOMOGENEISATION DU FAISCEAU _

. FIG : 46.

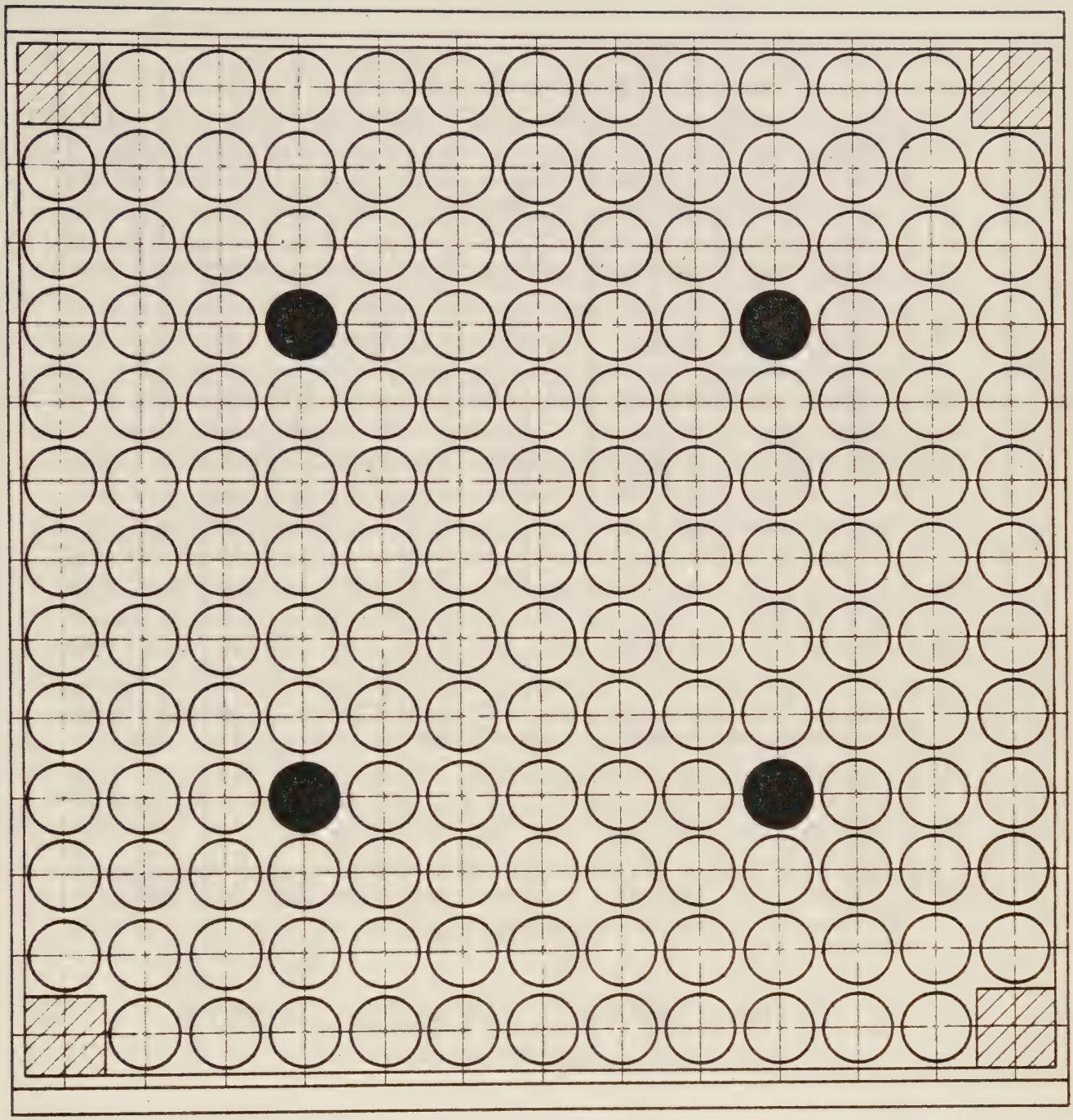


FIG:47 _POSITION DES CRAYONS $UO_2 - Gd_2O_3$ -

	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
1		155	161	164	168	172	176	174	173	173	175	176	
2	147	144	147	148	151	155	157	157	156	156	159	161	170
3	148	141	140	142	145	148	150	150	150	149	150	154	165
4	146	137	137	140	143	145	147	147	147	146	146	148	158
5	143	135	135	138	141	144	145	145	145	144	143	145	153
6	137	134	134	138	140	142	144	144	143	142	141	142	148
7	134	133	134	137	139	141	142	142	141	140	138	138	141
8	136	132	132	135	137	139	140	140	139	137	135	135	138
9	138	131	131	133	135	137	138	137	136	134	132	133	139
10	139	132	131	133	134	136	136	135	134	132	130	131	138
11	141	135	132	133	135	136	135	134	132	130	128	130	136
12	143	139	140	140	140	141	140	137	133	130	129	127	131
13		155	159	160	159	157	154	148	142	138	135	130	

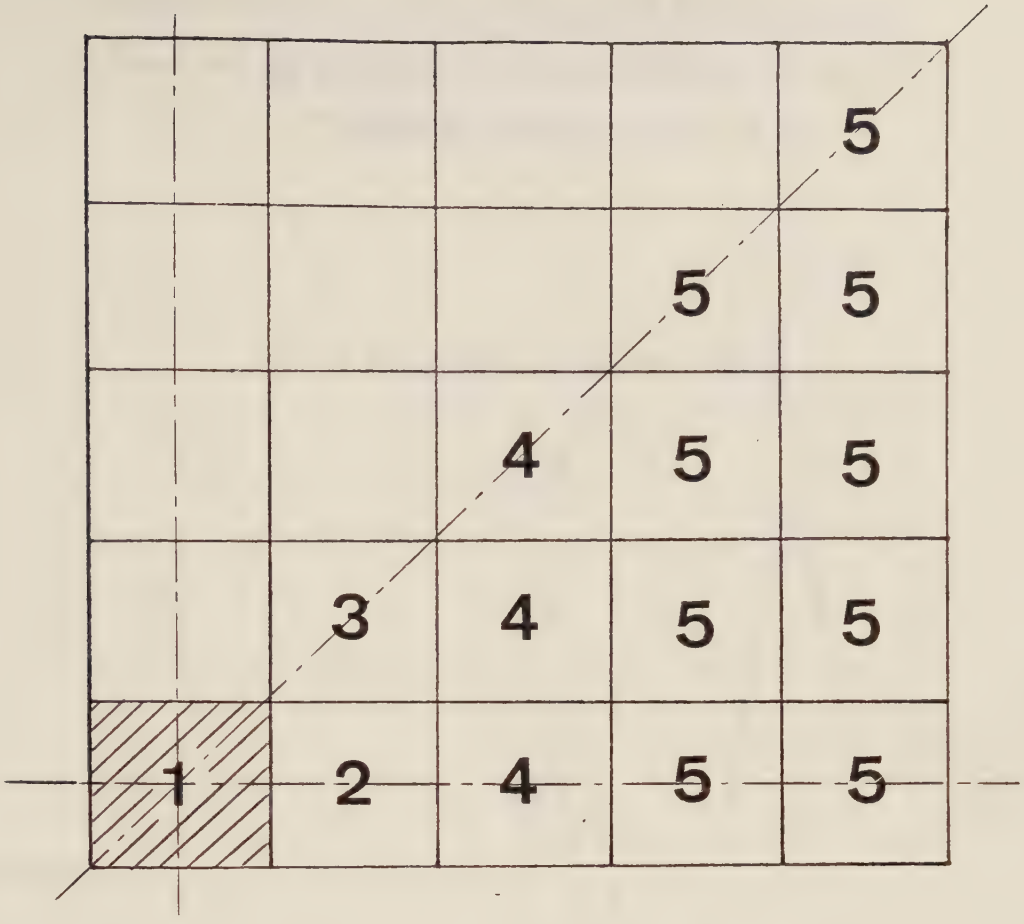
PUISSANCES DEGAGEES EN W/cm DANS LES CRAYONS PWR
AU PLAN MEDIAN

$BS_1 + BS_2 + BC_1$ HAUTES

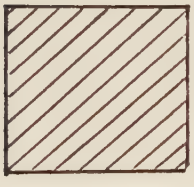
$BC_2 + BC_3$ BASSES

Fig. 4.3.2

Figure N° 48



I = Numéro de la cellule combustible



Cellule UO_2-Gd_2O_3

FIGURE N° 49

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE A LA SECTION EFFICACE DU GD 155 (+5%)

TENEUR EN GD203:3%

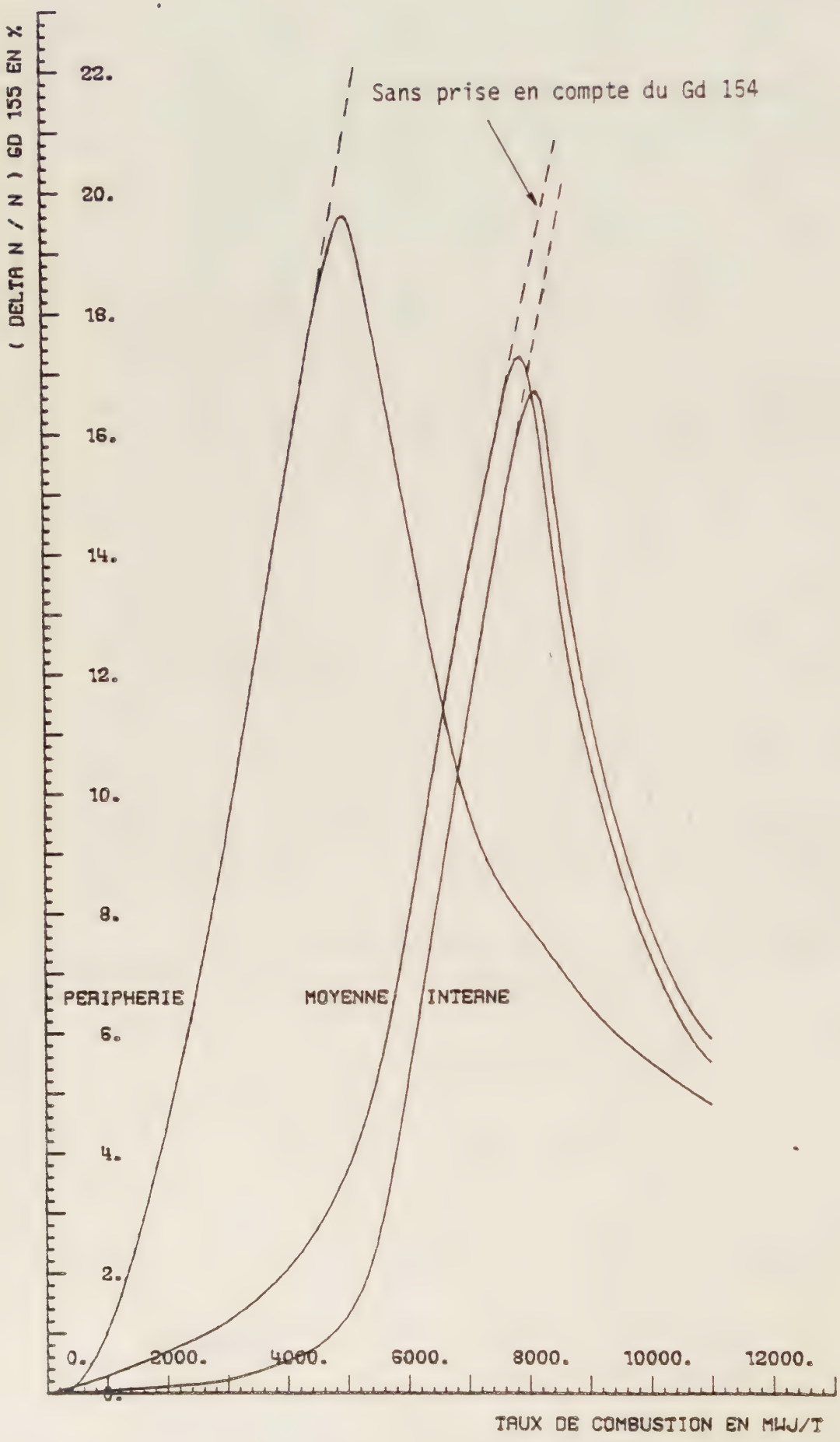


Figure N° 50

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE A LA SECTION EFFICACE DU GD 157 (+5%)

POUR UNE TENEUR EN GD203 DE 3%

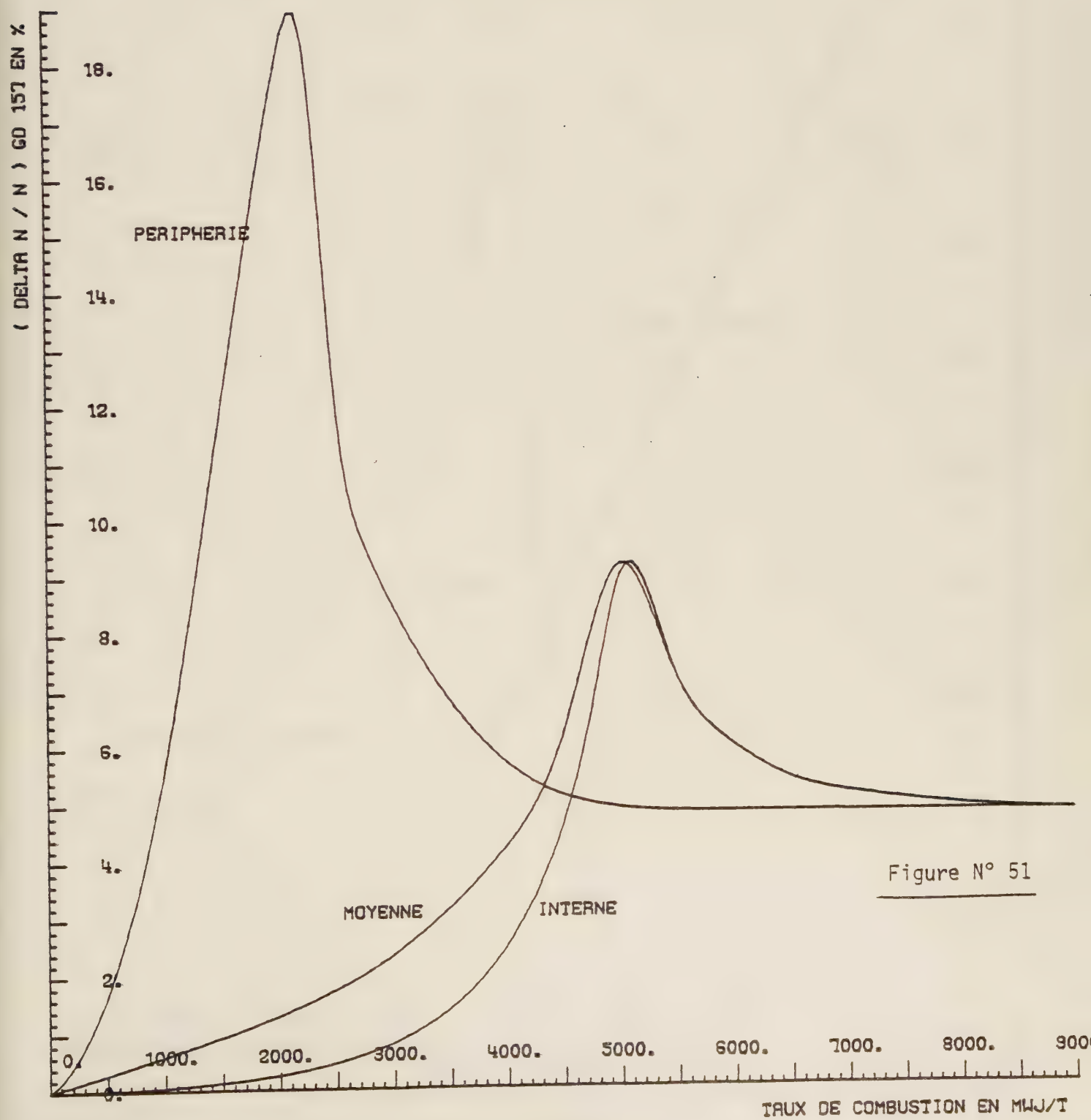


Figure N° 51

EFFET DU NIVEAU DE FLUX

SUR LE RAPPORT N5/N8 EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

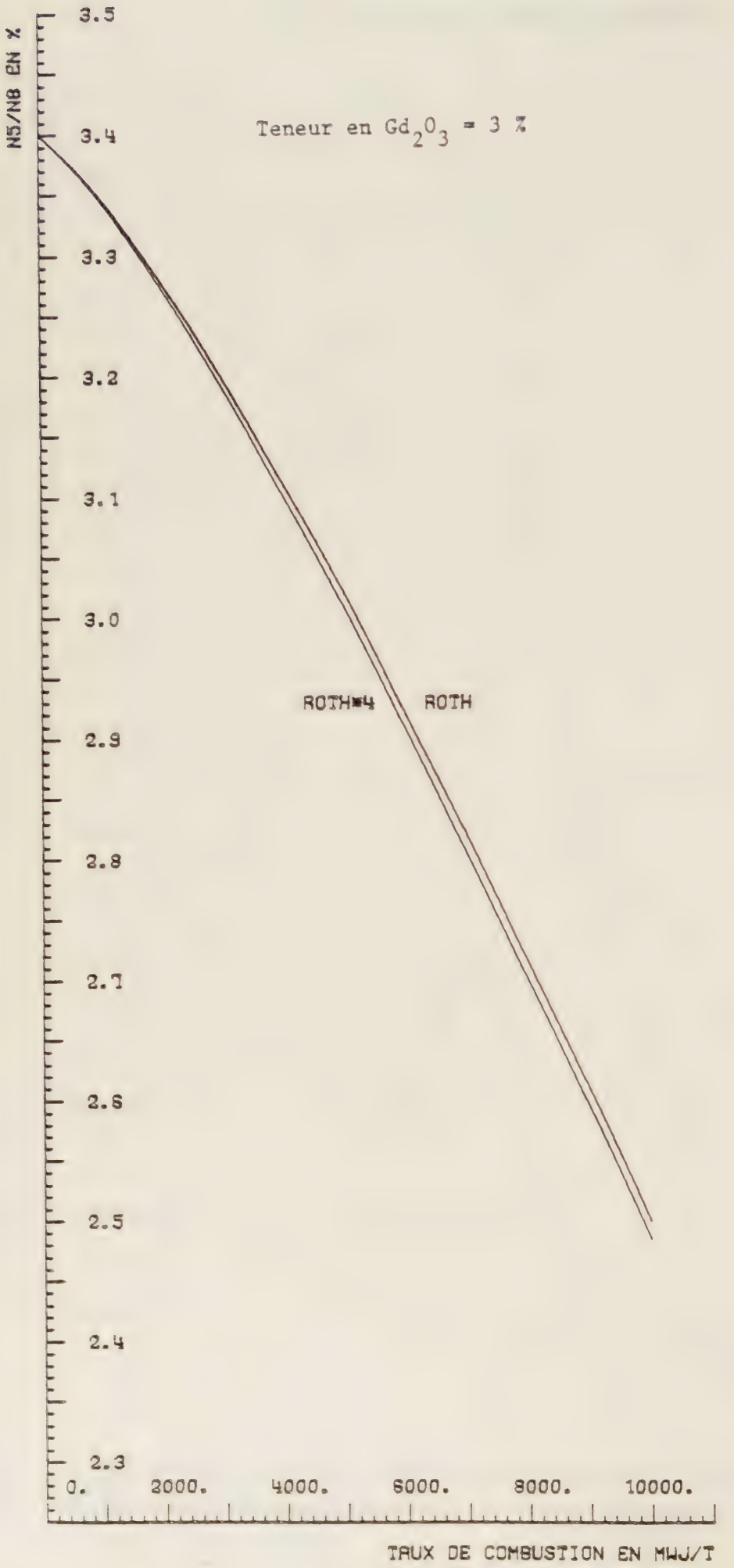


Figure N° 52

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE AU NIVEAU DE FLUX POUR UNE TENEUR EN GD203: 3%

ROTH-ROTH*4 / ROTH*4

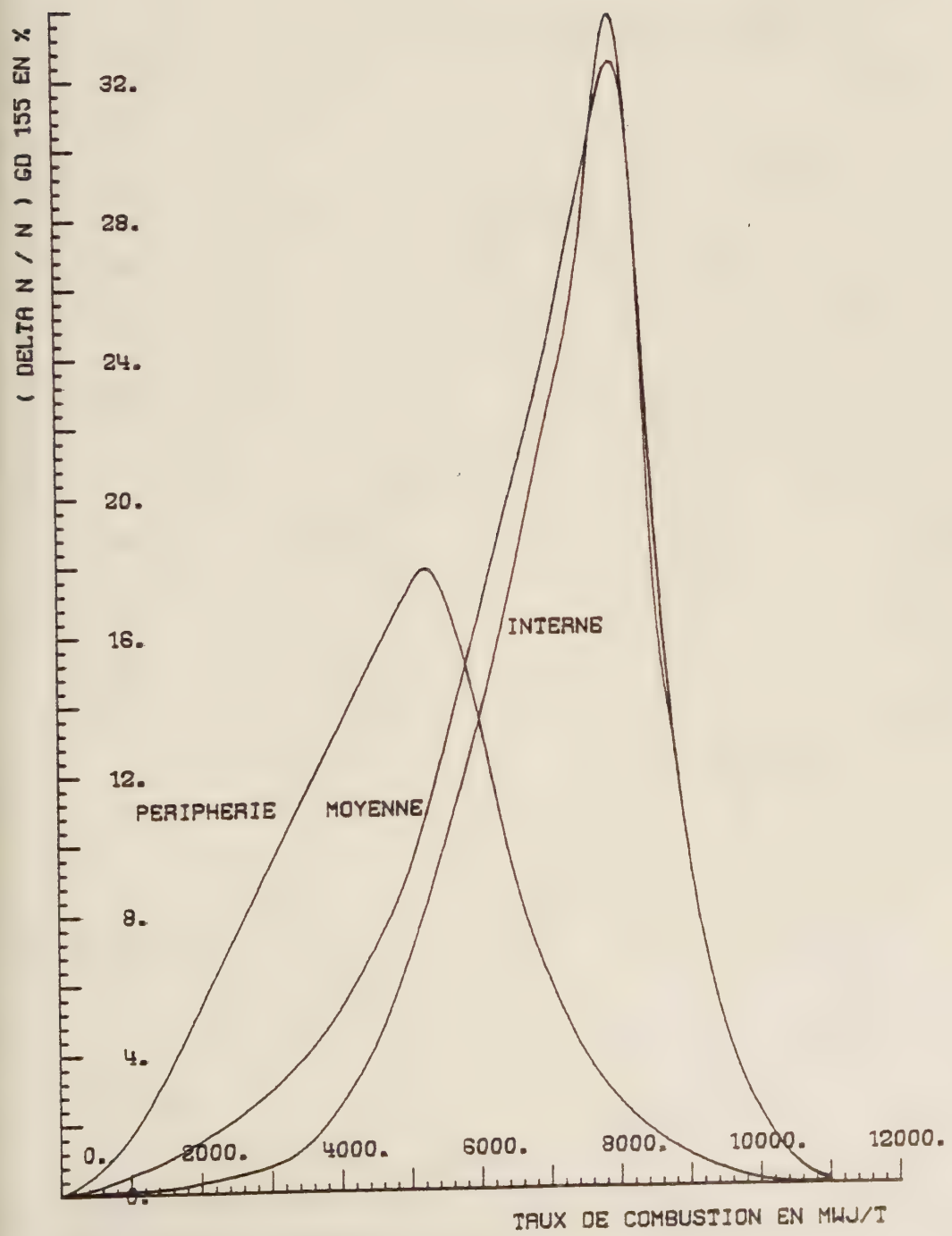


Figure N° 53

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE AU NIVEAU DE FLUX POUR UNE TENEUR EN GD203 DE 3%

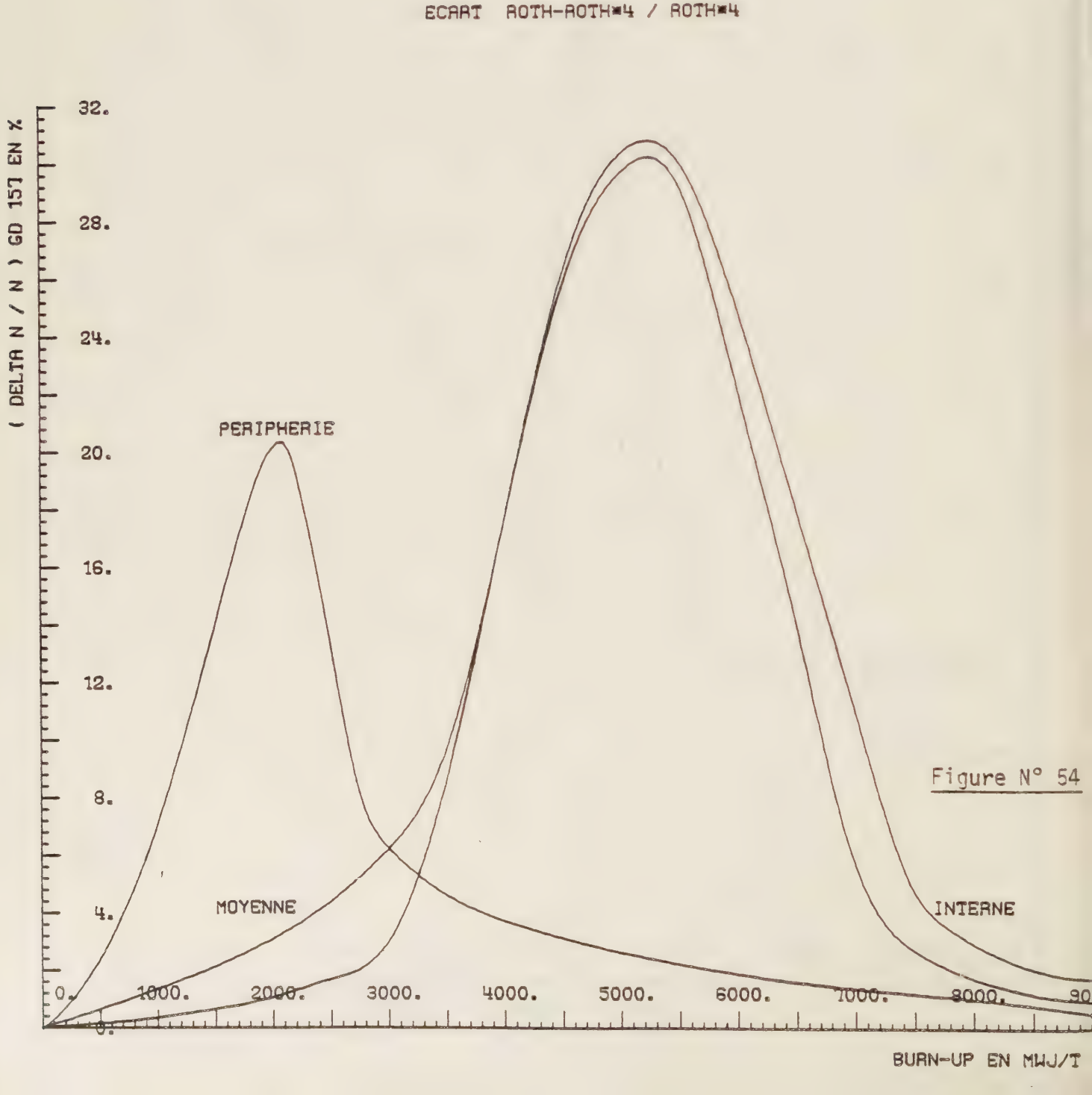


Figure N° 54

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE AU NIVEAU DE FLUX POUR UNE TENEUR EN GD203 DE 3%

ROTH-ROTH*4 / ROTH*4

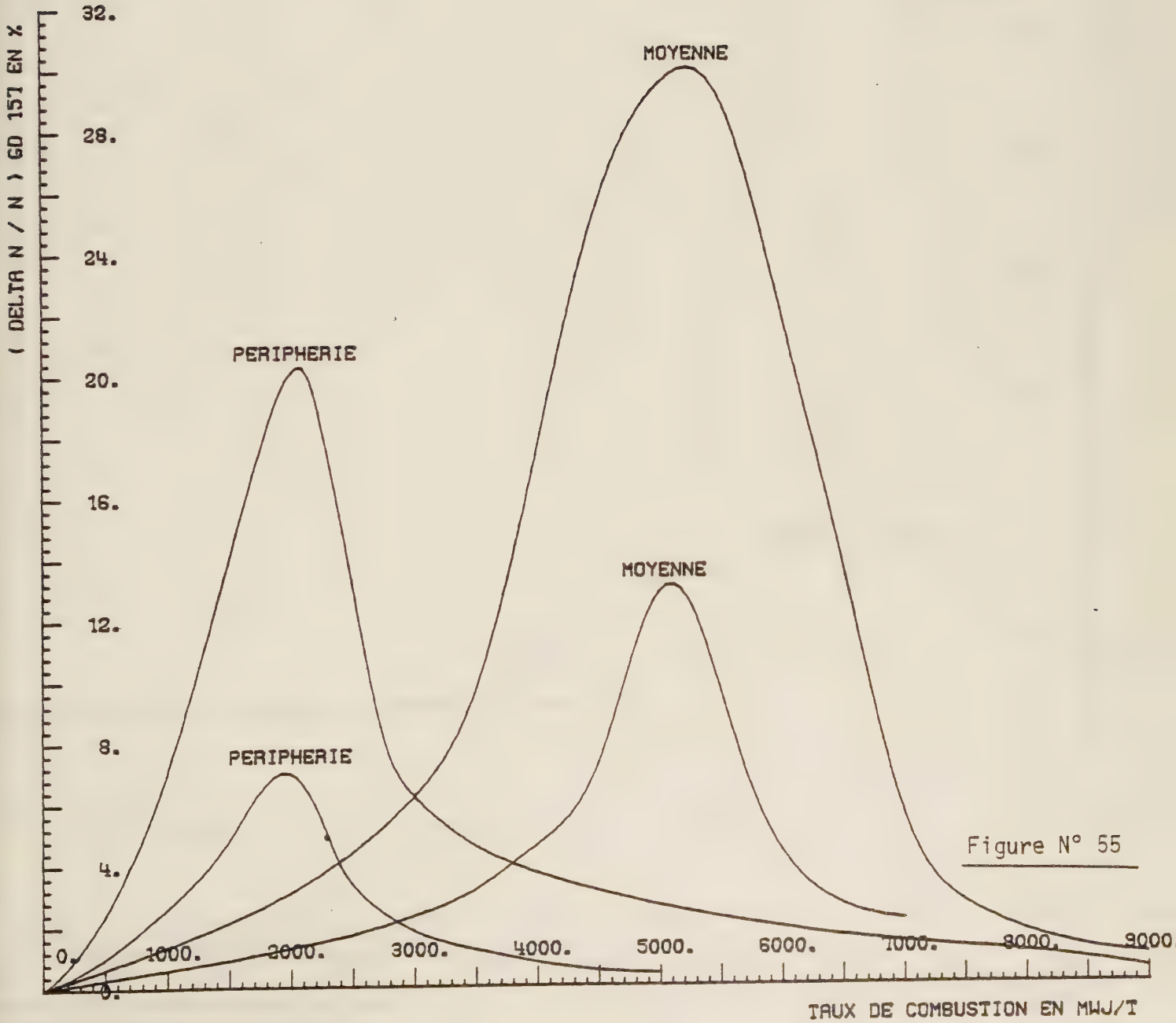


Figure N° 55

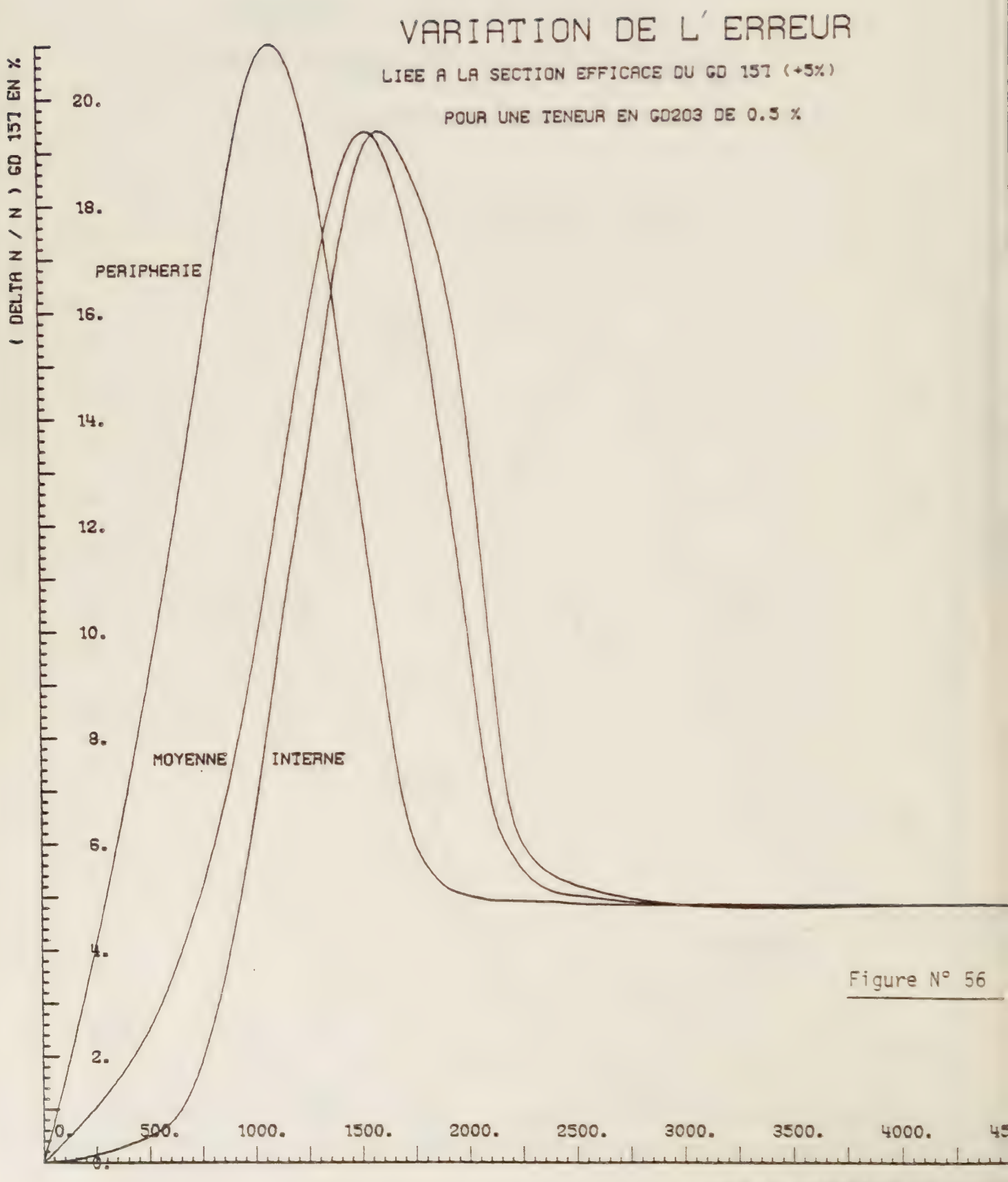

VARIATION DE L'ERREUR
LIEE A LA SECTION EFFICACE DU GD 157 (+5%)
POUR UNE TENEUR EN GD2O3 DE 0.5 %
(DELTA N / N) GD 157 EN %
20.
18.
16.
14.
12.
10.
8.
6.
4.
2.
0.
PERIPHERIE
MOYENNE
INTERNE
0.
500.
1000.
1500.
2000.
2500.
3000.
3500.
4000.
TAUX DE COMBUSTION EN MWJ/T

Figure N° 56

VARIATION DE L'ERREUR

LIEE A LA SECTION EFFICACE DU GD 157 (+5%)

POUR UNE TENEUR EN GD203 DE 8%

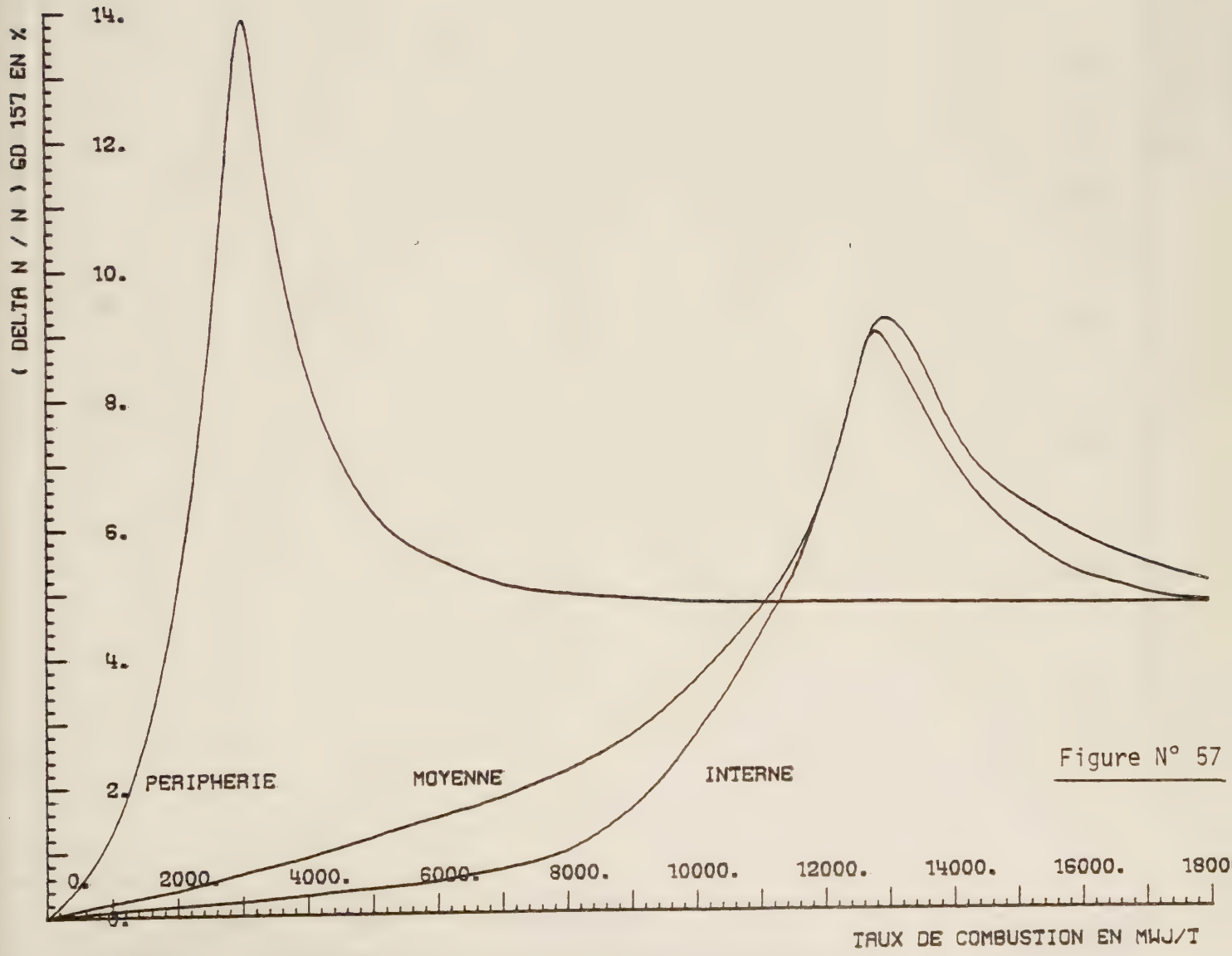


Figure N° 57

REPARTITION DE LA CONCENTRATION

EN GD 155 ET GD 157 A L'INTERIEUR DU CRAYON UO2-GD203

TENEUR EN GD203 : 8%

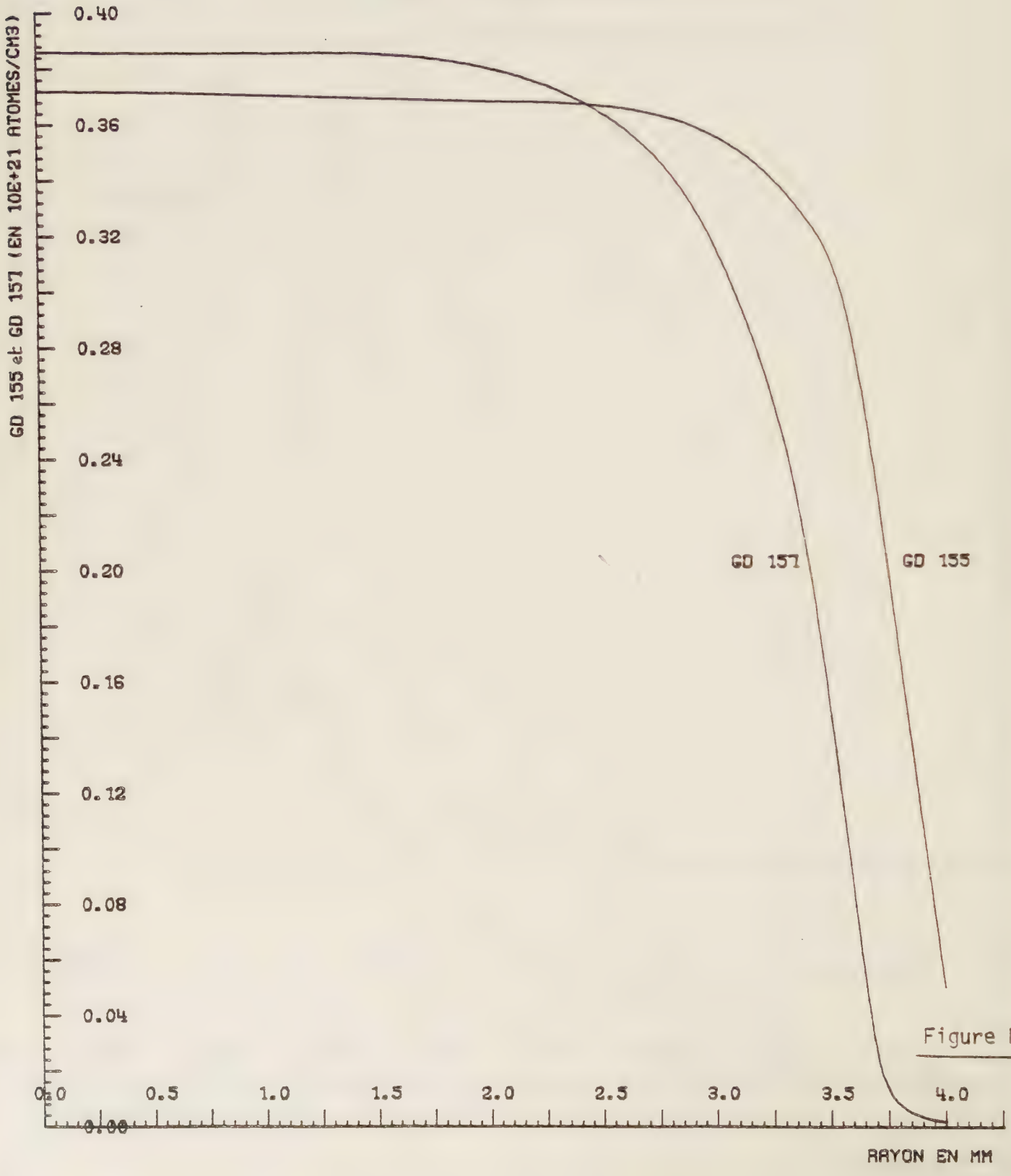


Figure N° 5

REPARTITION DE LA CONCENTRATION EN GD 157

DANS LE CRAYON UO2 CHARGE A 0.5 % EN GD2O3

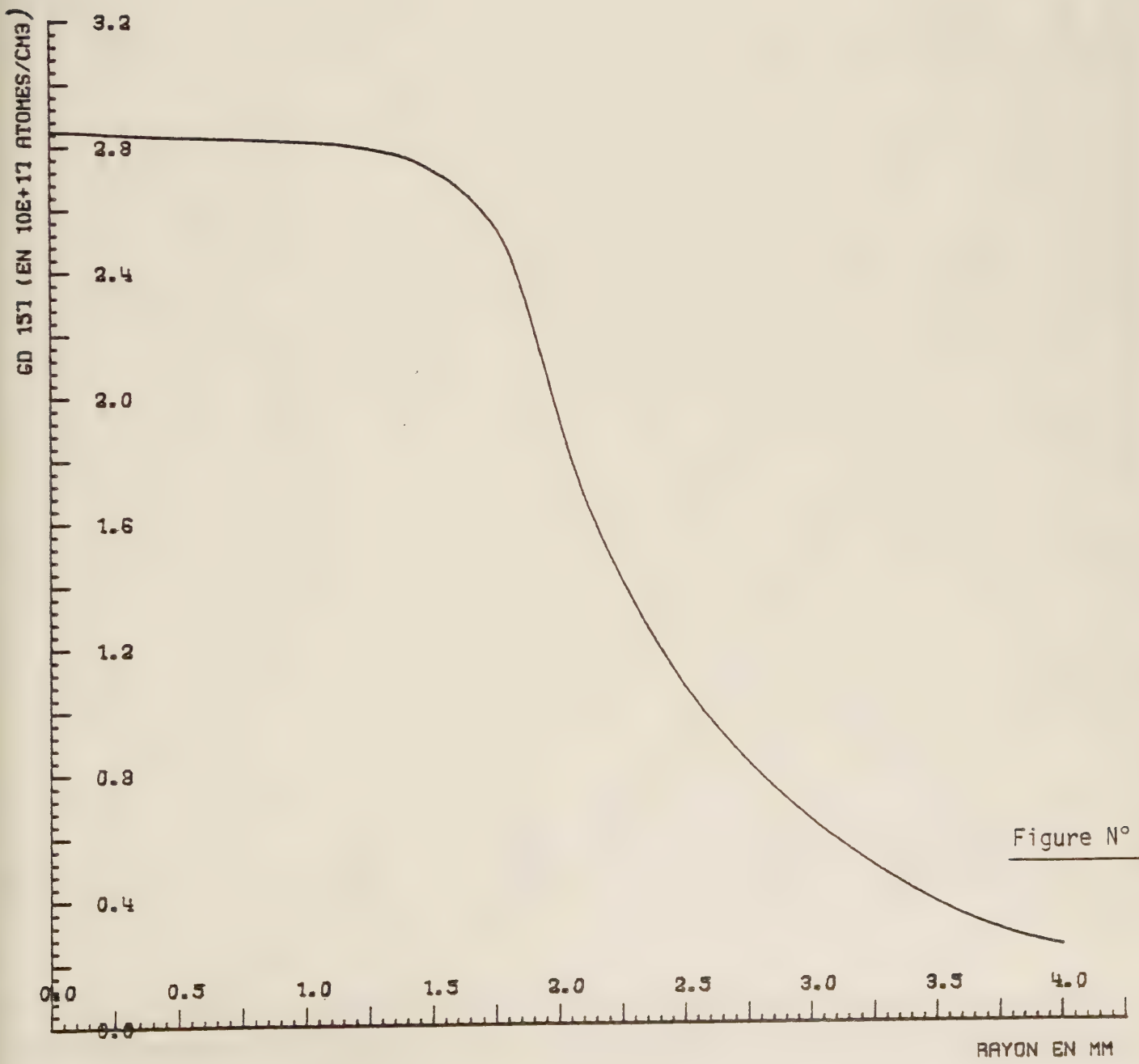


Figure N° 59

VARIATION DE LA CONCENTRATION EN GD 155 ET 15

EN FONCTION DE LA TENEUR INITIALE EN GD
ET DU TAUX DE COMBUSTION

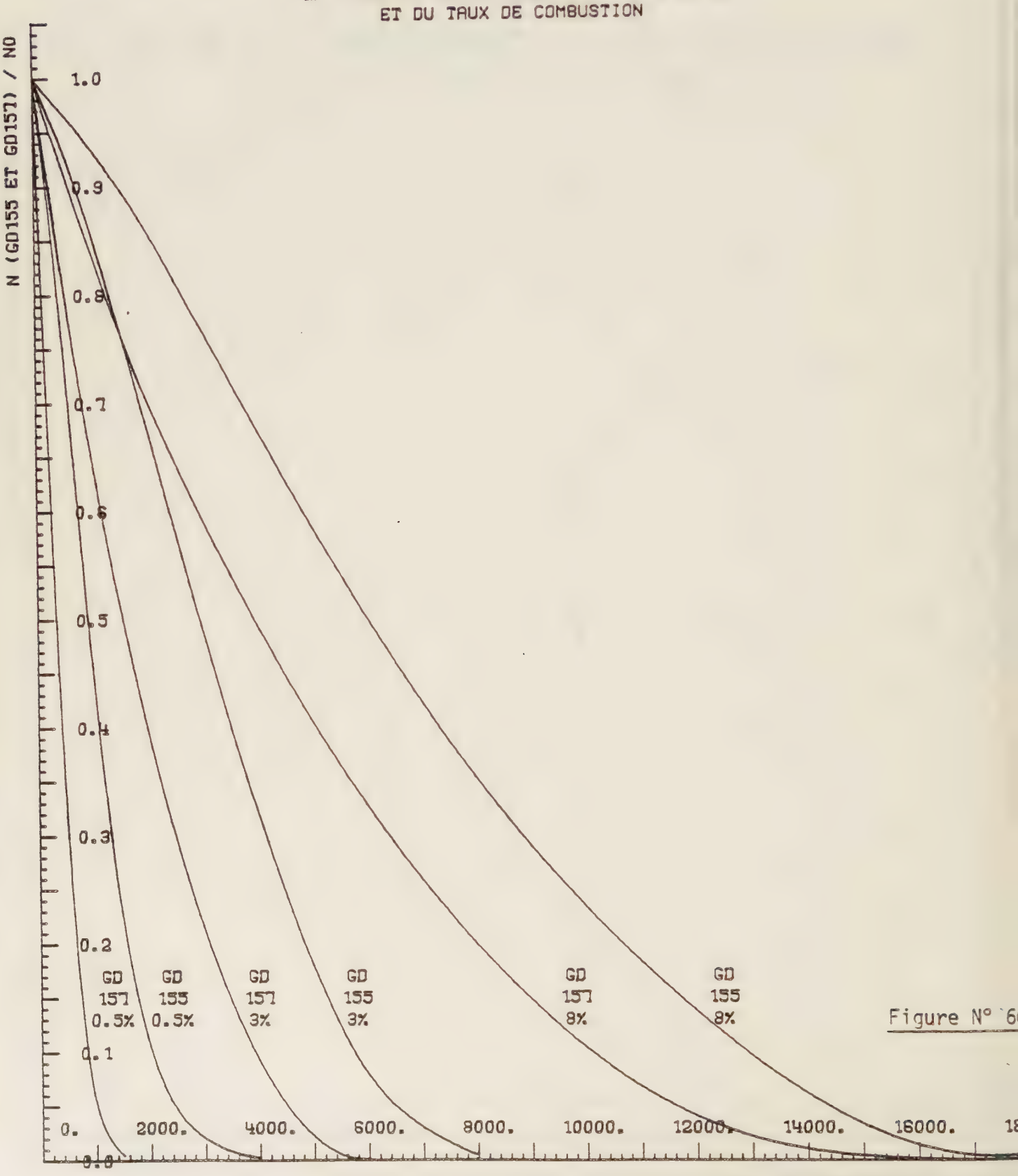


Figure N° 6

TAUX D'ABSORPTION DU GD

EN FONCTION DE LA TENEUR INITIALE EN GD

ET DU TAUX DE COMBUSTION

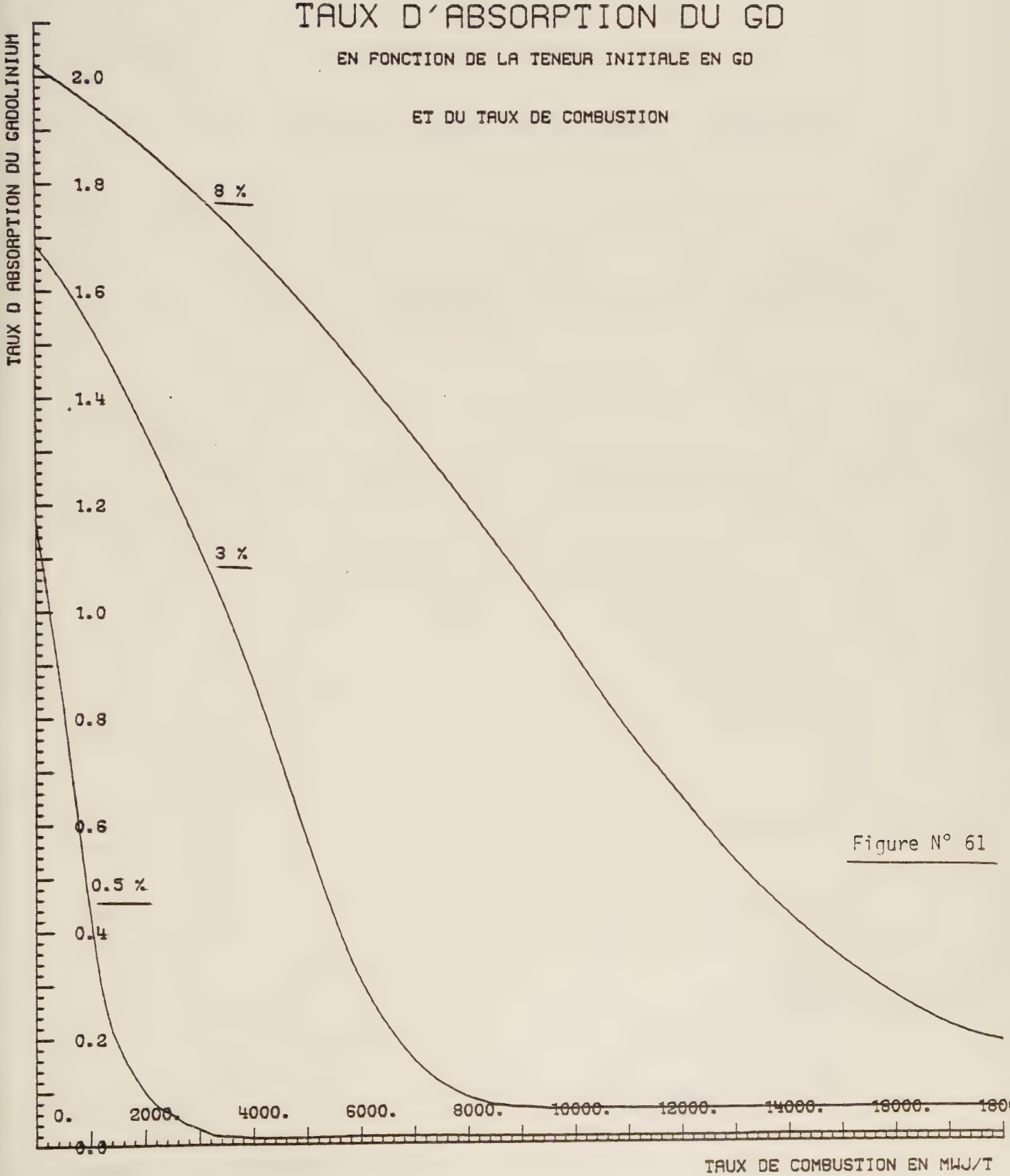


Figure N° 61

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

3245

PERMIS D'IMPRIMER

Doctorat 3° CYCLE

Thèse de PHYSIQUE NUCLEAIRE Option : physique des réacteurs

Nom CHAUCHEPRAT

Prénoms PATRICK

Date et lieu de naissance 21 SEPTEMBRE 1956 A GANNAT (ALLIER)

SUJET :

Thèse : CONTRIBUTION A LA QUALIFICATION DU CALCUL DU GADOLINIUM DANS LES REACTEURS A EAU

Vu et approuvé :

Orsay, le 18 JUIN 1982

Les Membres du Jury.

Ce document doit être remis à l'étudiant à l'issue de la soutenance.

Imprimé par le Bureau de Documentation du CEN/ CADARACHE